

湿地要素中碳氮同位素特征与水文连通的关系

郭雨桐, 崔 圆, 王 晨, 王 倩, 修玉娇, 肖 蓉, 张明祥

(北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

摘要: 为探究湿地三要素中碳氮稳定同位素分布特征与湿地水文连通的关系, 选取黄河三角洲恢复区和潮汐区湿地典型样点, 分析样点水文连通度、植物/土壤/水体悬浮颗粒物中碳氮稳定同位素分布特征及水文连通度与碳氮稳定同位素间的关系。结果表明: 恢复区芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)三种植物地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异。恢复区芦苇湿地水体悬浮颗粒物中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比潮汐区芦苇湿地的更低。潮汐区三个芦苇样点土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异, 但与恢复区芦苇土壤存在显著差异; 恢复区和潮汐区湿地区域水文连通度分别为0.0520和0.0484, 不同样点间水文连通度差异较大; 湿地水文连通度与植物地上部分及水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著负相关关系, 说明水文连通对水体悬浮颗粒物的来源及植物的碳代谢和生长可能存在影响。

关键词: 碳氮稳定同位素; 湿地要素; 水文连通; 黄河三角洲

湿地被喻为“地球之肾”, 是最具价值的生态系统之一^[1]。“湿地三要素”即湿地水文、土壤和植被之间相互影响、相互作用, 与湿地的生态功能和生态过程密切相关^[2], 湿地生态系统各要素中的物质迁移转化过程近年来也一直是国内外学者的关注热点。碳(C)和氮(N)作为构成生命的两种基本元素, 是生物地球化学循环的主体^[3]。在进行物质循环时, 碳和氮都会发生不同程度的同位素分馏效应^[4], 碳、氮同位素能够对有机物的迁移转化和来源进行判别分析, 作为表征生态系统中物质循环和能量流动特征及循环路径的指标^[5], 近年来已成为重要的研究手段, 在研究物质来源及循环过程方面已得到广泛应用^[6]。研究表明, 碳同位素自然丰度能够有效反映生态系统中碳素的微小迁移与转化, 示踪不同干扰条件下植被、土壤、水体中的碳过程^[7]; 氮素在生态系统中的迁移转化过程更为复杂, 生态系统不同组分中氮同位素自然丰度能够反映不同物源的相对贡献及氮素转移的信息^[8], 进而反映氮循环过程特征。因此, 研究湿地植被、水体、土壤中碳氮稳定同位素的分布特征对于探究湿地生态系统中营养物质的来源、迁移和转化等过程及变化规律具有重要意义。

近年来, 由于人为干扰的加剧, 湿地结构完整性严重受损, 连通性被阻断, 引发了一系列生态问题^[9]。因此, 如何恢复湿地的生态格局与功能成为研究热点。而湿地的水文连通格局, 是影响湿地生态系统内外部物质循环和能量流动等过程的重要因素^[10], 对维持湿地生态系统结构和功能的稳定具有关键作用, 引发了国内外学者的广泛关注。湿地

收稿日期: 2019-06-14; 修订日期: 2019-10-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505903); 国家自然科学基金项目(51609005); 北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-BH-01)

作者简介: 郭雨桐(1994-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 研究方向为湿地植物—土壤系统碳过程。

E-mail: 835758788@qq.com

通讯作者: 肖蓉(1985-), 女, 湖南常德人, 博士, 讲师, 研究方向为湿地生物地球化学。

E-mail: xiaorong@fzu.edu.cn

水文连通的改变会影响湿地的生境结构及理化特性,湿地结构的变化引起相关环境因子的变化^[1],进而影响湿地水体、土壤、植被等要素中的能量转化与物质循环,研究表明较高的水文连通能够为湿地发育提供更好的营养条件,有利于碳氮等营养元素的积累^[12]。目前国内外对于水文连通的研究主要集中于水文连通性评估、水文连通格局的演变等^[13-14],有研究表明水文连通受生境格局及植被条件的影响并反作用于二者^[15-16],但关于水文连通与湿地基本营养元素的关系仍不明确。

黄河口是中国三大河口之一,主要以滨海湿地、河流和河漫滩为主^[17]。由于海水入侵、上游来水减少及农业污染等问题,黄河三角洲湿地水文结构遭到严重破坏,土壤盐渍化程度加重,湿地功能退化^[18]。为保障湿地功能,自2002年起黄河三角洲自然保护区核心区及实验区内开始开展湿地恢复工程。工程通过围堤引渠等方式,每年向恢复区内引入约 $3\times 10^6\text{ m}^3$ 淡水^[19],湿地恢复工程使得原有的水文条件发生变化,进而影响湿地的水文连通结构。本文以黄河三角洲补水恢复区(简称恢复区)和潮汐区湿地为研究地,分析湿地三要素—植物、水体及土壤中碳氮稳定同位素特征,探究恢复区和潮汐区湿地水文连通情况,并探讨碳氮稳定同位素与湿地水文连通度及环境因子的关系,以期为河口湿地水文连通修复及碳氮元素的生物地球化学循环研究提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区域

研究区位于山东黄河三角洲国家级自然保护区潮汐区及恢复区湿地,保护区地理坐标为 $37^{\circ}35'\sim 38^{\circ}12'\text{N}$ 、 $118^{\circ}33'\sim 119^{\circ}20'\text{E}$ 。黄河三角洲是中国温带最辽阔、最完好的原生湿地。此区域属温带大陆性季风气候,年均温度 12.3°C ,年均降水量 555.9 mm ,年蒸发量 1962.1 mm ,土壤类型以潮土和盐土为主^[17]。研究区内主要分布的植物有芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、香蒲(*Typha orientalis*)等。

1.2 样品的采集与处理

2016年9-10月于黄河三角洲大汶流管理站辖区内的恢复区及潮汐区开展随机采样。恢复区内主要分布芦苇、盐地碱蓬和香蒲3种植被,潮汐区广泛分布芦苇。于恢复区香蒲、芦苇和盐地碱蓬中各设置一个样点,分别标记为R1、R2和R3;根据距黄河的垂直距离及植被的长势条件,于潮汐区三个不同位置各设置一个芦苇样点,分别标记为T1、T2和T3,每个样点3个重复。在每个样点上进行水体、植物及土壤样品的采集(图1)。采集0~50 cm深度的土壤样品,以10 cm为单位共采集5层土壤。现场去除动植物残体、碎石等杂物,用保鲜袋密封带回。同时,分别采集每个样点新鲜植株的地上部分及地下根系用以碳氮稳定同位素的测定。

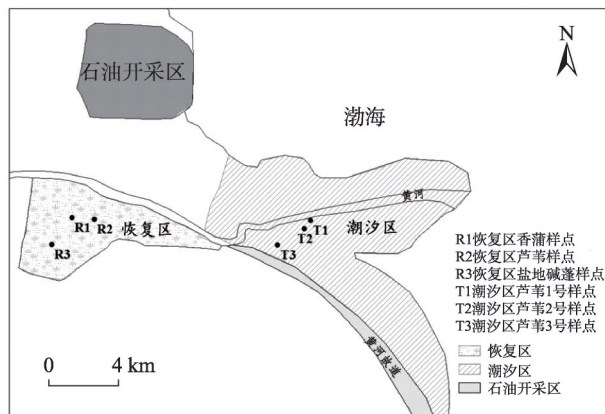


图1 研究区示意图及采样地分布

Fig. 1 The sketch map of study area and distribution of sampling sites

利用便携式pH计 (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA) 和电导率仪 (VMR Scientific, West chester, PA, USA) 测定土壤pH和电导率 (土水比为1:5); 利用元素分析仪测定土壤总碳、有机碳及总氮含量。

植物样品经50℃烘干至恒重, 用球磨仪 (Restch-RM 200) 磨碎后过100目筛; 水样使用预先在450℃下灼烧过的GF/F滤膜 (孔径0.45 μm) 抽滤后, 将滤膜进行冷冻干燥, 通过10%的HCl浸泡及蒸馏水淋洗至中性后, 提取水体中悬浮颗粒物用以稳定同位素分析^[20]。土壤样品经酸化后用去离子水淋洗, 65℃下干燥, 研磨过筛后与植物及水体悬浮颗粒物样品用同位素质谱仪 (Finigen-MAT253) 测定碳氮稳定同位素值。

1.3 水文连通度的计算

基于水流阻力的图论法^[21]计算研究区不同样点的水文连通度: 首先建立河网图模型 Q , 得到表征节点之间边连接数的邻接矩阵 $W=(w_{ij})_{n \times n}$, 再基于水流阻力得到加权邻接矩阵, 计算区域的水文连通度, 最后根据采样点到最近水体的垂直距离作为权值量化每个采样点的水文连通度。具体方法如下:

1.3.1 建立河网图模型

河流的源头、边界以及汇合点视为图的节点 (在恢复区和潮汐区内分别识别出节点r1~r19和t1~t26), 河道视为边, 得到河网分布示意图, 如图2所示:

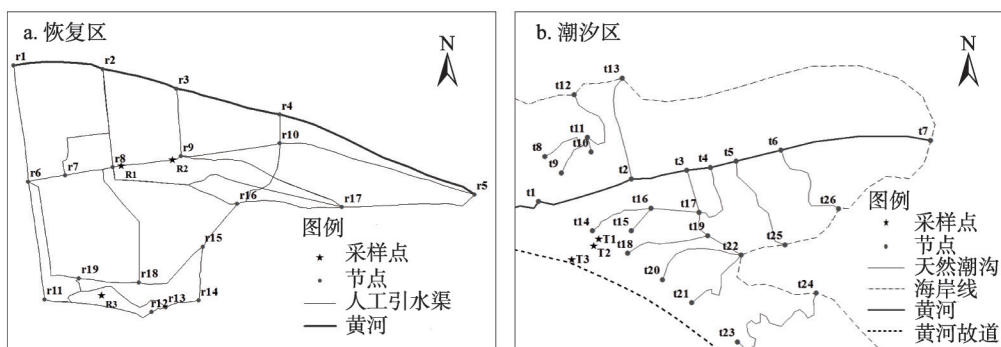


图2 研究地恢复区和潮汐区河网示意

Fig. 2 Schematic diagram of river channel network in restored wetland and tidal wetland

建立河网图模型 Q , 用邻接矩阵 $W=(w_{ij})_{n \times n}$ 表示。 p_{ij} 是相邻节点之间的关系, 即两节点之间连接的边数。

1.3.2 基于水流阻力计算边权值

考虑河道长度^[21]、宽度、深度、糙率系数和坡度^[22]等水流阻力因素对连通性的影响, 对 m_{ij} 进行加权处理。边权值 w 用水流阻力 H 的倒数表示, 即 $w=1/H$ 。因此, 边权值 w 最终表示为^[21]:

$$w = \left[\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{2/3} / (l \times n) \quad (1)$$

式中: b 为河道底宽; h 为水深; m 为边坡系数; l 为水流距离; n 为曼宁糙率系数。

于2016年9-10月对研究区的人工引水渠及天然潮沟的水深和底宽进行测量, 并借助ArcGIS软件获得研究区域内人工引水渠及天然潮沟长度, 最终数值取平均值。同时参考

河道设计规范及相关研究^[22-23]得到河道的糙率系数和边坡系数, 相关数据如表1所示。

1.3.3 计算区域水文连通指数

取相邻两节点之间边权值的最大值($f_{ij}=\max w_{ij}$)表示该河道的水流畅

通度。任一节点的水流畅通度 D_i 用 f_{ij} 的平均值表示, 即 $D_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}$, $i \neq j$ 。最终区域的水文连通度 D 为所有节点 D_i 的平均值^[21]。

1.3.4 量化每个样点的水文连通指数

样点距离水体的距离越大, 水文连通程度越小, 即 $d_i \propto 1/l$ 。因此, 本文用采样点到最近水体的垂直距离作为权值量化每个采样点的水文连通度, 并采用归一化方法对距离进行标准化。最终样点的水文连通度 d_i 表示为:

$$d_{Ri} = D_R \left(l_i / \sum_1^{19} l_i \right)^{-1}$$
$$d_{Ti} = D_T \left(l_i / \sum_1^{26} l_i \right)^{-1}$$

(2)

式中: l_i 表示样点到水体的垂直距离; d_{Ri} 和 d_{Ti} 分别表示恢复区和潮汐区样点的水文连通度; D_R 和 D_T 分别表示恢复区和潮汐区的水文连通指数。

1.4 数据处理与分析

利用SPSS 18.0软件对实验数据进行处理和显著性检验。采用最小显著差数法进行单因素方差分析。采用线性拟合和非线性最小二乘拟合对数据进行相关分析。使用ArcGIS 10.2和SigmaPlot 13.0软件绘图。

2 结果分析

2.1 湿地植物、水体及土壤中碳氮稳定同位素的分布特征

由测试结果可知, 所有采样点植物地上部分中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围是-30.73‰~-23.83‰, 平均值是-26.75‰, 变异系数为7%; 植物地下部分中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围是-29.53‰~-23.13‰, 平均值是-25.44‰, 变异系数为8%。通常C3植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于-34‰~-20‰之间^[24], 本实验采集的香蒲、芦苇及盐地碱蓬均属于C3植物。三种植物中, 香蒲的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 芦苇的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高。水体悬浮颗粒物(TSS)中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围是-16.10‰~-5.99‰, 平均值是-10.64‰, 变异系数为29%; 土壤样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围是-30.66‰~-7.65‰, 平均值是-13.65‰, 变异系数为32%。

植物地上部分中 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围是2.02‰~8.96‰, 平均值是5.11‰, 变异系数为34%; 植物地下部分中 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围是3.48‰~10.09‰, 平均值是6.25‰, 变异系数为29%。相较于水体悬浮颗粒物中 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化, 植物地上及地下部分 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异较小, 其中香蒲的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高。水体悬浮颗粒物中 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围是0.32‰~12.16‰, 平均值是4.69‰, 各样点间 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异较大, 变异系数达到73%; 土壤样品中 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围是1.30‰~16.93‰, 平均值是8.60‰, 变异系数为34%。

所有采样点中, 恢复区R1与R3样点植物的地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著低于其余样

表1 研究区水流阻力参数

Table 1 Hydraulic resistance parameters of the study area

河道类型	底宽/m	水深/m	曼宁糙率	边坡系数
黄河	468.08	2.5	0.0275	1 : 3
人工引水渠	4.64	0.94	0.0225	1 : 3
天然潮沟	7.59	0.58	0.0200	1 : 2

点,植物的地上及地下部分 $\delta^{15}\text{N}$ 值均显著高于其余样点,恢复区三种植物的地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异,呈现出芦苇>盐地碱蓬>香蒲的规律。恢复区芦苇与潮汐区芦苇植物地上及地下 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异(图3a、图3b)。所有水体中,恢复区三个样点间及潮汐区三个样点间水体 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别存在显著差异。对比发现恢复区芦苇湿地水体悬浮颗粒中 $\delta^{13}\text{C}$ 值比潮汐区芦苇湿地水体悬浮颗粒中 $\delta^{13}\text{C}$ 值更低;土壤样品中,R3样点的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均显著低于其它样点。对比四个植被覆盖均为芦苇的土壤样品发现,恢复区R2样点土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值与潮汐区三个芦苇样点存在显著性差异, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均呈现R2<T1,T2,T3的规律,但潮汐区同为芦苇植被的三个样点间土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无显著差异。对比发现恢复区土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值比潮汐区土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值更低。

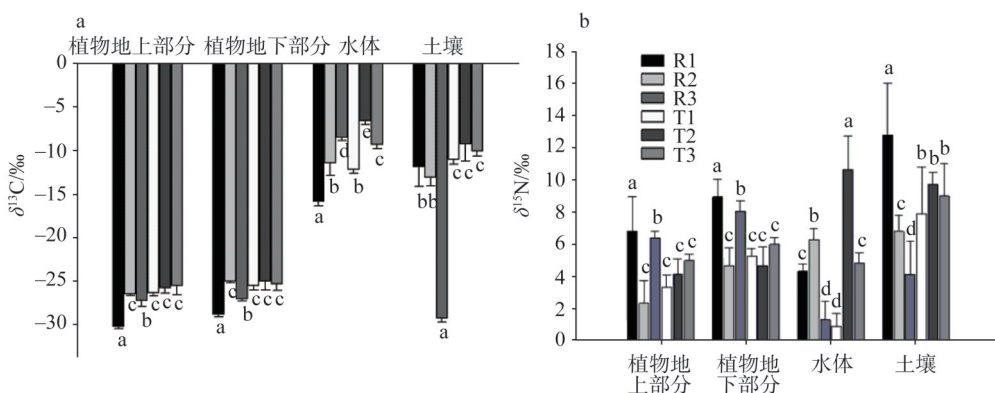


图3 各样点植物、水体悬浮颗粒物及土壤中碳和氮稳定同位素比值

Fig. 3 Stable carbon and nitrogen isotope ratio of plants, TSS and soil from different sampling sites

由图4a可知,表层土(0~10 cm)中 $\delta^{13}\text{C}$ 值由小到大表现为R3<R2<T1<R1<T2<T3,40~50 cm土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值由小到大表现为R3<R1<R2<T3<T1<T2,恢复区样点相较于潮汐区样点具有更低的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值,R3样点各层深度的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为最低。T2、T3和R2样点土壤样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体随深度加深变化较小;随土壤深度的增加,R1样点呈现出偏负(0~20 cm)—偏正(20~40 cm)—偏负(40~50 cm)的变化趋势,R3和T1样点呈现出偏正(0~20 cm)—偏负(20~30 cm)—偏正(30~40 cm)的趋势,R3样点的变幅最大达到43%。从整体上看,与潮汐区相比,恢复区土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度变化更为敏感。

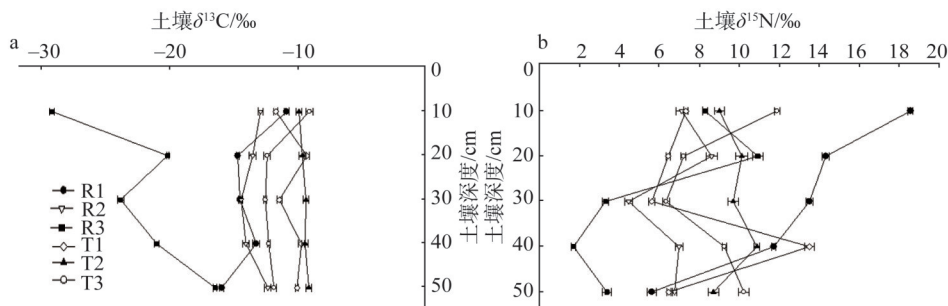


图4 黄河口湿地各样点不同深度土壤中碳氮稳定同位素比值分布

Fig. 4 Soil stable carbon and nitrogen isotope ratio of sampling sites at different depths

由图 4b 可知,表层土(0~10 cm)中 $\delta^{15}\text{N}$ 值由小趋大表现为 $\text{R2} < \text{T1} < \text{R3} < \text{T2} < \text{T3} < \text{R1}$,恢复区与潮汐区土壤分布无明显规律;深层土壤(40~50 cm)中 $\delta^{15}\text{N}$ 值由小趋大表现为 $\text{R3} < \text{R1} < \text{T1} < \text{R2} < \text{T2} < \text{T3}$,恢复区土壤具有相对较低的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值。随着深度的增加,各样点土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值相较于 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度更大。 R1 样点的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值随深度增加不断减少,且变幅最大达到70%; R2 和 R3 样点整体呈现增大(0~20 cm)—减小(20~40 cm)—增大(40~50 cm)的趋势; T2 样点的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值变幅较小仅为3%, T1 和 T3 样点整体呈现出先减小后增大的趋势。从整体上看,与潮汐区相比,恢复区土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随深度变化更为敏感。

2.2 基于水流阻力与图论的水文连通度

通过构建恢复区和潮汐区河网模型,计算得到恢复区和潮汐区的水文连通度分别为0.0520和0.0484。

根据样点与河道/沟渠之间的垂直距离及样区的水文连通度得到每个样点的水文连通度如表 2 所示。结果表明,不同采样点间的水文连通度差异较大(0.61~4.84),变幅达到87%。恢复区 R1 样点的水文连通度最高,可能是因为样点 R1 位于高程较低的新老黄河河道交汇处,明水面积较大且与水体距离较近; R3 由于

表 2 研究区各样点水文连通度

Table 2 The hydrological connectivity of sampling sites in the study area			
样点	距离水体距离/m	无量纲化	水文连通度
R1	11.44	93.16	4.84
R2	21.18	50.32	2.62
R3	81.00	13.16	0.61
T1	19.51	54.63	2.65
T2	47.21	22.58	1.09
T3	25.99	41.01	1.99

距离河道沟渠较远,因此在量化水文连通度时分值较低。在植被条件同为芦苇的样点中, R2 样点水文连通度与 T1 较为接近,大于 T2 和 T3 样点。即相同植被条件下,恢复区的水文连通度略大于潮汐区水文连通度,这可能与恢复区内人工挖掘的引水渠使得明水面积增大并与黄河干流形成闭合流路有关。

比较三种不同植被条件样点的水文连通度得到排序为:香蒲>芦苇>盐地碱蓬,即香蒲群落所在的样点水文连通度最高,盐地碱蓬群落所在样点的水文连通度最低,这反映了植物与水土条件间的交互影响和反馈机制。

2.3 碳氮稳定同位素分布与水文连通度及土壤理化性质的关系

湿地土壤理化性质数据详见表 3。相关分析和回归分析结果表明,湿地水文连通度与水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值及植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著的负相关关系(表 4、图 5a、图 5b)。植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值与水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值及植物地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著正

表 3 各样点土壤理化性质

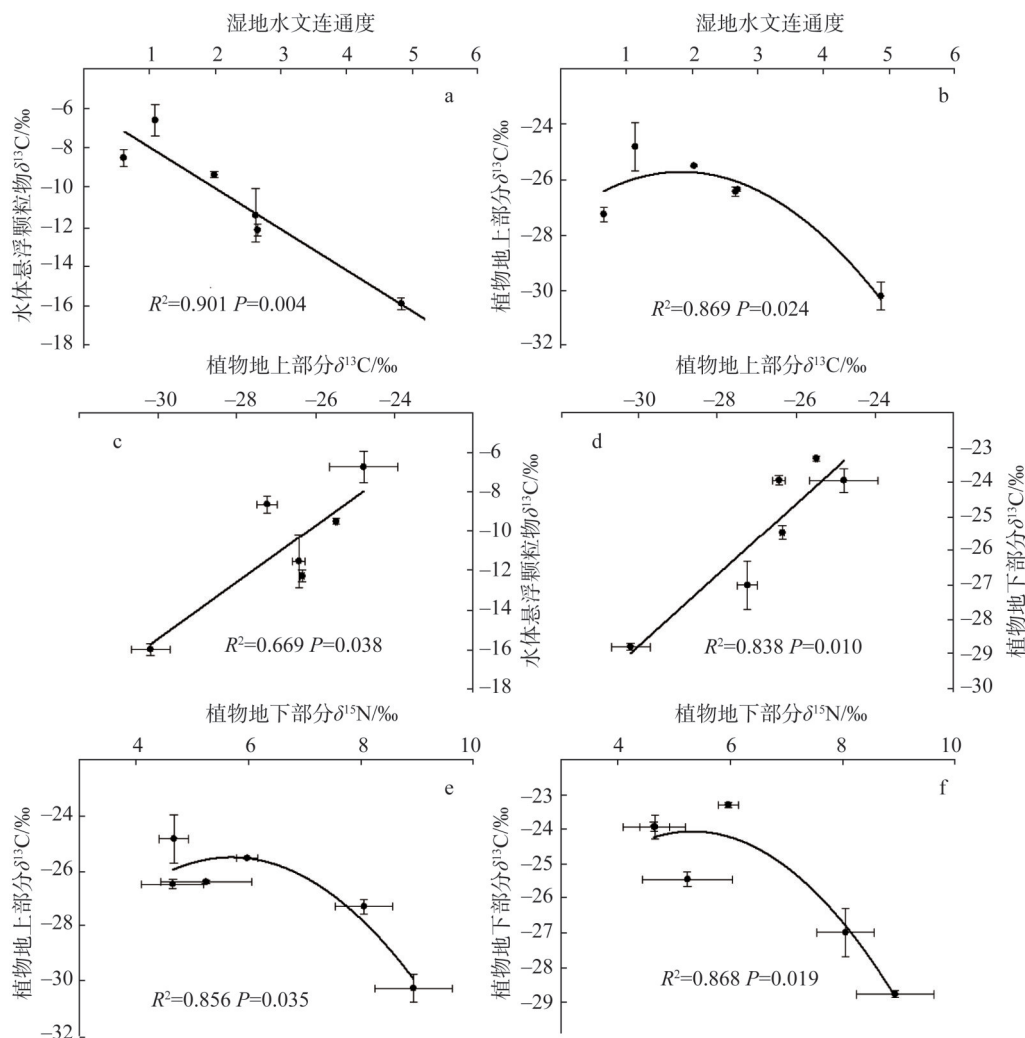
Table 3 Soil physicochemical properties of sampling sites

样点	pH	电导率/(mS · cm ⁻¹)	含水率/%	TOC/(mg · g ⁻¹)	TN/(mg · g ⁻¹)	C/N
R1	7.91	0.46	47.88	2.36	0.22	46.73
R2	7.97	0.61	29.84	4.96	0.59	33.72
R3	8.14	1.45	18.30	1.94	0.67	13.91
T1	8.10	4.20	19.57	2.96	0.36	37.51
T2	7.95	4.37	31.74	2.18	0.61	19.17
T3	7.86	4.49	24.59	1.08	0.42	18.71

表 4 土壤、植物和水体悬浮颗粒物中碳氮稳定同位素含量与水文连通度及土壤理化性质的关系

Table 4 Correlations among contents of carbon and nitrogen stable isotopes in soils, plants and TSS, hydrological connectivity and soil physicochemical properties															
	水文连 通度	pH	电 导 率	含 水 率	TOC	TN	C/N	TSS $\delta^{13}\text{C}$ 值	植物地上 $\delta^{13}\text{C}$ 值	植物地下 $\delta^{13}\text{C}$ 值	土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值	TSS $\delta^{15}\text{N}$ 值	植物地上 $\delta^{15}\text{N}$ 值	植物地下 $\delta^{15}\text{N}$ 值	土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值
水文连通度	1														
pH	-0.41	1													
电导率	-0.41	-0.07	1												
含水率	0.82*	-0.55	-0.45	1											
TOC	0.11	0.1	-0.28	0.01	1										
TN	-0.89**	0.53	0.11	-0.73*	0.31	1									
C/N	0.95**	-0.32	-0.52	0.82*	0.37	-0.72	1								
TSS $\delta^{13}\text{C}$ 值	-0.95**	0.15	0.52	-0.67	-0.31	0.81	-0.9*	1							
植物地上 $\delta^{13}\text{C}$ 含量	-0.85*	-0.01	0.73	-0.67	0.07	0.65	-0.68	0.84*	1						
植物地下 $\delta^{13}\text{C}$ 含量	-0.5	-0.29	0.59	-0.50	0.07	0.45	-0.43	0.63	0.92*	1					
土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值	-0.35	-0.39	-0.26	0.10	-0.31	0.28	-0.35	0.47	0.08	0.11	1				
TSS $\delta^{15}\text{N}$ 值	-0.13	-0.6	0.13	0.33	0.23	0.16	-0.01	0.41	0.41	0.48	0.57	1			
植物地上 $\delta^{15}\text{N}$ 含量	0.07	-0.01	0.03	0.22	-0.85*	-0.4	-0.17	-0.07	-0.43	-0.58	0.30	-0.21	1		
植物地下 $\delta^{15}\text{N}$ 含量	0.36	-0.08	-0.53	0.38	-0.62	-0.46	0.21	-0.48	-0.84*	-0.88*	0.19	-0.47	0.8	1	
土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值	0.38	-0.63	-0.35	0.74	-0.47	-0.5	0.28	-0.22	-0.5	-0.42	0.64	0.41	0.64	0.58	1

注：*、**分别表示在0.01、0.05水平上显著。



注: a表示水文连通度与水体悬浮颗粒物 $\delta^{13}\text{C}$; b表示水文连通度与植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$; c表示植物地上部分与水体悬浮颗粒物 $\delta^{13}\text{C}$; d表示植物地上部分与植物地下部分 $\delta^{13}\text{C}$; e表示植物地下部分 $\delta^{15}\text{N}$ 与植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$; f表示植物地下部分 $\delta^{15}\text{N}$ 与植物地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 。

图5 水文连通与水体、植被中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的相关关系

Fig. 5 Correlation between hydrological connectivity and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in TSS and plants

相关(表4、图5c、图5d),进一步证实水文连通对湿地要素中碳循环过程的影响。植物地下部分 $\delta^{15}\text{N}$ 值与植物地上和地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值及土壤有机碳含量也呈显著正相关关系(表4、图5e、图5f),说明植物地下部分氮同位素分布与植物体内和土壤中碳元素分布在应对环境演化中的协同变化关系^[4]。

土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ 值与土壤含水率的相关系数为0.74,相关系数较高但关系不显著;与土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值相关系数最大(0.64)的指标为土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ 值,但未达到显著正相关水平。所有环境指标与土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无显著的相关关系,从一定程度上说明影响土壤中碳氮稳定同位素积累的过程和原因较为复杂。此外,水文连通度与样点土壤的含水率及C/N有极显著的正相关关系,且与土壤总氮呈负相关(表4)。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 所有样点中植物地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度较小, 变异系数分别为7%和8%。水体悬浮颗粒物和土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值变异系数分别为29%和32%。各样点中 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比变化更为剧烈, 植物地上部分、植物地下部分、水体悬浮颗粒物及土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ 值变异系数分别为34%、29%、73%和34%。

(2) 恢复区三种植物地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异, 不同区域芦苇地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异, 说明植物物种自身特定的 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{15}\text{N}$ 固持和代谢机制对其体内 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{15}\text{N}$ 分布的影响远大于外在因素的影响。恢复区芦苇湿地与潮汐区芦苇湿地相比, 水体悬浮颗粒物和土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值更低, 这可能与植被分布及补水降低了恢复区湿地土壤盐度有关。

(3) 黄河三角洲湿地恢复区和潮汐区的区域水文连通度分别为0.0520和0.0484。香蒲样点的水文连通度最高为4.84, 盐地碱蓬样点的水文连通度最低为0.61, 说明适于较深水环境及固持水土能力更强的香蒲群落, 与水文连通形成正向互馈关系的能力更强, 而盐地碱蓬群落对水文连通的变化则可能更为敏感。

(4) 湿地水文连通度与水体悬浮颗粒物中及植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著的负相关关系, 水文连通对水体悬浮颗粒物的来源及植物的生长和碳代谢可能存在影响。植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值与水体悬浮颗粒物、植物地下部分及土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的正相关关系, 进一步说明植物和水体对于湿地土壤碳过程的影响。然而关于湿地土壤碳过程中植物及水体对于土壤碳固持、转移等行为的贡献程度及其内在作用机理有待进一步研究。

3.2 讨论

3.2.1 湿地中碳氮稳定同位素分布特征及其影响因素

植物进行光合作用时对 $\delta^{13}\text{C}$ 有分馏作用, 因此光照、 CO_2 含量等与光合作用相关的因素均会对植物体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响^[25]。植物在缺水的状态下会为减少蒸腾而关闭气孔, 从而降低叶片内 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 也有研究表明芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥相对含水量呈显著的负相关关系^[26], 本实验中植物地上部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水率的相关系数为-0.67但不显著, 可能与植物茎组织内 $\delta^{13}\text{C}$ 富集有关。植物体中的 $\delta^{15}\text{N}$ 值能够在一定程度上反映植物生理过程与气候环境的相互作用^[27], Robinson^[28]的研究结果表明其与温度、土壤类型、植物体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值及N的有效性显著相关, 本研究也有类似结果(表4)。此外, 研究表明由于分馏作用, 根系中 $\delta^{13}\text{C}$ 值略高于茎叶中 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[29], 与本实验结果相符(图3)。同一区域不同植被地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值有显著差异, 但不同区域的芦苇地上及地下部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异, 说明植物物种自身特定的 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{15}\text{N}$ 固持和代谢机制对其体内 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{15}\text{N}$ 分布的影响远大于外在因素的影响^[30]。但在某些藻类等结构较为简单的沉水植物中, 外在碳源的多少能够很大程度的影响植物的光合途径, 从而改变植物体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[31]。一般而言, 土壤养分高的环境中, 植物体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值增多, 二者呈正相关关系^[32], 本实验也证实了这一点(表4)。

水体悬浮颗粒物中碳氮主要受内源和外源有机物影响, 内源有机物主要指浮游生物、藻类等, 外源有机物指植物、土壤等^[33]。恢复区三个样点水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异, 可能与植被组成的差异有关; 此外水体浊度及悬浮颗粒物浓度等

都会对水体碳氮稳定同位素产生影响^[34]。在一定浓度范围内，土壤浸提液的电导率能够反映土壤的盐度^[35]，研究表明黄河三角洲湿地恢复工程显著降低了土壤盐度^[18]，而水体悬浮颗粒中 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤电导率的正相关关系（表4）可以在一定程度上解释湿地恢复区芦苇湿地水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于潮汐区芦苇湿地水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的原因。

为探究不同区域碳氮稳定同位素分布特征，经查阅文献得到中国部分地区碳氮同位素值，具体结果见表5。土壤的理化特性及营养物质与土壤中碳氮稳定同位素值密切相关。有实验表明土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量呈正相关，与C/N呈负相关^[33]，这与本文的实验结果基本一致（表4）。土壤有机碳含量与其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系可以表征土壤有机质的分解情况，二者呈正相关表示分解程度高，呈负相关表示分解程度低^[41]。由表4可知，本实验中土壤有机碳与土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈负相关关系，说明黄河三角洲湿地土壤有机质分解程度低，土壤有较好的固碳作用，这可能受覆盖植被的生长及土壤自身呼吸状况的影响^[42]，也与土壤贫 $\delta^{13}\text{C}$ 输入有关^[43]，而恢复区土壤中养分含量较高也可能与淡水的补给有关^[44]。土壤中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值能够反映其生长植被的特点^[36]，R3样点土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低，相对较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值体现了植物脱落物和微生物活动对其的影响^[45]，恢复区三个不同植被类型土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异也说明植被条件会对碳氮稳定同位素的分布产生一定影响。恢复区土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 值与潮汐区土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比更低，可能与恢复区盐地碱蓬和香蒲植物自身 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低有关。由表5可知不同尺度及地区间的同位素值略有差别。太湖流域植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高，因为太湖生长着繁多的淡水水生植物，根据文献可知湿地生态系统稳定条件下的植物稳定同位素值都较高^[31]。黄河三角洲植物 $\delta^{15}\text{N}$ 值略高于长江口潮滩、东江流域及青藏高原（青藏高原 $\delta^{15}\text{N}$ 最高值高于黄河三角洲）；而黄河三角洲土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化幅度最大，这可能与黄河口湿地类型及植被类型多样有关。

表5 中国部分地区碳氮同位素含量分布
Table 5 Distribution of carbon and nitrogen isotopes in parts of China (%)

	C3 植物		土壤（沉积物）	
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
长江口潮滩 ^[32]	-30.0~24.3	1.6~8.3	-24.9~22.4	2.0~5.2
鄱阳湖 ^[36-37]	-33.13~27.85	—	-28.35~18.58	3.27~6.84
青藏高原 ^[30,38-39]	-28.76~23.81	-3.46~11.16	-26.46~24.60	4.43~7.05
太湖流域 ^[31,40]	-24.58~20.07	7.29~16.59	-19.3~24.5	4.5~15.2
东江流域 ^[20]	-29.67~24.56	0.67~7.67	-27.26~24.03	4.31~7.03
黄河三角洲	-30.73~23.13	3.48~10.09	-30.66~7.65	1.30~16.93

3.2.2 水文连通对湿地中碳氮稳定同位素分布的可能影响及其环境指示

基于湿地的水文生态过程，水文的连通性与水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{15}\text{N}$ 值密切相关^[43]，研究表明较好的水文连通度能够减弱悬浮颗粒物中碳氮同位素组成的差异性^[46]。本研究结果显示，湿地水文连通度与水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值呈负相关关系。水文连通度越高的水体其滞留时间越短，而已有研究表明水体的滞留时间是控制水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的关键因素^[47]。水文连通度强的水体流动性较强，不利于水体悬浮颗粒物的保留，因此较高的水文连通度可能导致水体悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值减少。但是，氮在水中的动态比碳更复杂，沉积物的释放和再悬浮可以改变简单的相关性^[48]。同时，水文连通度高的水体有利于水环境中氧气、二氧化碳和营养物的供给与交换，植物

的同化速率和呼吸速率也会随之加快，从而促进植物的生长代谢和能量及营养物质的循环^[49]，而C3植物在呼吸过程中主要排出含 $\delta^{13}\text{C}$ 的 CO_2 ^[50]，这使得 $\delta^{13}\text{C}$ 在植物体内富集程度降低。因此，湿地水文连通度与植物中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈负相关关系，这与本文的研究结果一致（表4、图5a、图5b）。

水分是影响植被多样性的关键指标^[51]，水文连通是驱动湿地生态过程的重要因素之一，它影响植被的组成和生境格局，也与其形成互馈机制^[7]。不同的水文连通度在一定程度上代表了潮间带湿地土壤的水沙特征和理化性质的差异，继而影响潮间带不同湿地植被的分布^[16]。本实验中，R3样点的水文通度显著低于R1和R2样点，说明相比碱蓬，香蒲和芦苇能在更深水深和更强水动力条件下存活、生长繁殖；且香蒲和芦苇的根茎较粗壮^[52]，固持水土能力较强，庞大的根系又起到稳定堤岸的作用，可增加河流沟渠的分支及蜿蜒度^[53]，从而进一步提高区域的水文连通度。相比之下，盐地碱蓬植株较小、根系不发达，且恢复区内的盐地碱蓬群落一般分布在光滩或上覆水较浅的浅滩上，即盐地碱蓬群落采样点的地形和水土状况即证实了该样点水文连通度较低的事实；同时由于盐地碱蓬相对香蒲和芦苇植株较小、根系纤细也导致其固持水土能力较弱，从而导致由植被生长驱动的水文连通度增加幅度不及香蒲和芦苇群落。利用ArcGIS软件对样点遥感影像数据进行处理，提取高程、NDVI、EVI等地形及植被数据，并与样点水文连通度进行相关性分析，具体结果见表6。结果表明，水文连通度与NDVI、EVI之间呈正相关关系（表6），但均不显著。可能的原因是研究时突出了不同区域内基于水网的水文连通度，并未考虑水的来源。而研究表明，土壤水盐条件是影响植被覆盖空间格局的关键因子^[54]，因此水文连通度高并不意味着区域内有充足的淡水资源用于促进大多数植物大范围的生长。

表6 水文连通度与地形因子、植被的相关关系

Table 6 Correlation between hydrological connectivity and topographic factors and vegetation

	水文连通度	高程	坡度	地形起伏度	地面粗糙度	地形湿度指数	NDVI	EVI
水文连通度	1							
高程	-0.15	1						
坡度	-0.28	0.00	1					
地形起伏度	-0.35	0.11	0.88**	1				
地面粗糙度	-0.24	0.11	0.88**	0.80**	1			
地形湿度指数	0.40	-0.44*	-0.45*	-0.46*	-0.44*	1		
NDVI	0.15	0.49*	-0.26	-0.29	-0.24	-0.17	1	
EVI	0.10	0.53**	-0.20	-0.25	-0.19	-0.23	0.99**	1

致谢：感谢课题组成员马梓文、董盼盼硕士以及魏卓群同学等成员在本研究实验开展和文章撰写过程中提供的帮助！

参考文献(References):

[1] CONSTANZA R, D'ARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Eco-logical Economics*, 1998, 25(1): 3-15.

[2] 殷书柏, 李冰, 沈方. 湿地定义研究进展. *湿地科学*, 2014, 13(1): 55-65. [YIN S B, LI B, SHEN F. Study on wetland

- definition. *Wetland Science*, 2014, 13(1): 55-65.]
- [3] 李雪双, 贺世杰, 金秉福, 等. 环青海湖区域植物稳定碳氮同位素空间分布规律及影响因素研究. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2018, 34(2): 167-172. [LI X S, HE S J, JIN B F, et al. Spatial distribution pattern and influencing factors of stable carbon and nitrogen isotopes in plants around Qinghai Lake region. *Journal of Ludong University: Natural Science Edition*, 2018, 34(2): 167-172.]
- [4] 张金美. 鄱阳湖区典型真水生植物组织中碳、氮同位素特性研究. 南昌: 南昌大学, 2016. [ZHANG J M. Characteristics of stable carbon and nitrogen isotope signatures of typical euhydrophyte species in Poyang Lake. Nanchang: Nanchang University, 2016.]
- [5] 梁红, 黄林培, 陈光杰, 等. 滇东湖泊水生植物和浮游生物碳氮稳定同位素与元素组成特征. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1400-1412. [LIANG H, HUANG L P, CHEN G J, et al. Patterns of carbon and nitrogen stable isotopes and elemental composition of lake primary producers and zooplankton in Eastern Yunnan. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(5): 1400-1412.]
- [6] 岳甫均, 李军, 刘小龙. 利用氮同位素技术探讨天津地表水氮污染. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1403-1408. [YUE F J, LI J, LIU X L. Nitrogen pollution of surface water in Tianjin based on nitrogen isotope approach. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1403-1408.]
- [7] GUO Q, ZHU G, CHEN T, et al. Spatial variation and environmental assessment of soil organic carbon isotopes for tracing sources in a typical contaminated site. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 175: 11-17.
- [8] MEYERS L M, NAHLIK A M, DEKEYSER E S. Relationship between the natural abundance of soil nitrogen isotopes and condition in North Dakota wetlands. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 394-401.
- [9] DAVIDSON N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 936-941.
- [10] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594. [GAO C J, GAO X C, JIA P. Summary comments on hydrologic connectivity. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(3): 586-594.]
- [11] 崔保山, 蔡燕子, 谢焱, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(6): 738-746. [CUI B S, CAI Y Z, XIE T, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: Problems and prospects. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2016, 52(6): 738-746.]
- [12] REID M A, REID M C, THOMS M C. Ecological significance of hydrological connectivity for wetland plant communities on a dryland floodplain river, Macintyre River, Australia. *Aquatic Sciences*, 2016, 78(1): 139-158.
- [13] BRACKEN L J. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119: 17-34.
- [14] PHILLIPS R W, SPENCE C. Connectivity and runoff dynamic in heterogeneous basins. *Environment Management*, 2009, 90(11): 3675-3686.
- [15] DOU P, CUI B S. Dynamics and integrity of wetland network in estuary. *Ecological Informatics*, 2014, 24(1): 1-10.
- [16] YUAN J. Linking metrics of landscape pattern to hydrological process in a lotic wetland. *Landscape Ecology*, 2015, 30(10): 1893-1912.
- [17] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析. 地理科学, 2012(6): 717-724. [WANG Y L, YU J B, DONG H F. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2012(6): 717-724.]
- [18] 郑立地, 肖蓉, 姚新颖, 等. 黄河三角洲潮汐区和生态恢复区湿地土壤特征和重金属分布. 湿地科学, 2015, 13(5): 535-542. [ZHENG L D, XIAO R, YAO X Y, et al. Soil properties and heavy metal distributions in soils of tidal areas and restored areas in the Yellow River Delta. *Wetland Science*, 2015, 13(5): 535-542.]
- [19] 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 等. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议. 湿地科学, 2011, 9(2): 107-115. [SUN Z G, MU X J, CHEN X B, et al. Actualities, problems and suggestions of wetland protection and restoration in the Yellow River Delta. *Wetland Science*, 2011, 9(2): 107-115.]

- [20] 魏秀国, 沈承德, 孙彦敏, 等. 珠江水体悬浮颗粒物有机碳稳定同位素组成及分布特征. 地理科学, 2003, 23(4): 471-476. [WEI X G, SHEN C D, SUN Y M, et al. Stable isotope composition and distribution characteristics of organic carbon in suspended particles of Pearl River water. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(4): 471-476.]
- [21] 徐光来, 许有鹏, 王柳艳, 等. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价. 水科学进展, 2012, 23(6): 776-781. [XU G L, XU Y P, WANG L Y, et al. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 776-781.]
- [22] 孟慧芳, 许有鹏, 徐光来, 等. 平原河网区河流连通性评价研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 626-631. [MENG H F, XU Y P, XU G L, et al. Study on river cinnectivity evaluation in plain river network area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 626-631.]
- [23] 陈星, 许伟, 李昆朋, 等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价: 以常熟市燕泾圩为例. 水资源保护, 2016, 32(2): 26-29. [CHEN X, XU W, LI K P, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: A case study of Yanjingwei in Changshu city. *Water Resources Protection*, 2016, 32(2): 26-29.]
- [24] CERLING T E, QUADE J, WANG Y, et al. Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators. *Nature*, 1989, 341: 138-139.]
- [25] 陈新, 贡璐, 李杨梅, 等. 典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征. 环境科学, 2018, 39(10): 4735-4743. [CHEN X, GONG L, LI Y M, et al. Spatial variation of soil organic carbon and stable isotopes in different soil types of a typical oasis. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4735-4743.]
- [26] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制. 土壤学报, 2005, 42(1): 1-8. [CHEN Q Q, SHEN C D, SUN Y M, et al. Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan biosphere reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 1-8.]
- [27] 段中华, 乔有明, 全小龙, 等. 黄河源区湿地、草地土壤理化性质和碳氮组成及其稳定同位素特征分析. 水土保持学报, 2015, 29(4): 247-252. [DUAN Z H, QIAO Y M, QUAN X L, et al. Analysis of nitrogen and carbon composition and stableisotope characteristics and physicochemical properties of wetland and grassland soil in source region of the Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 247-252.]
- [28] ROBINSON D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycles. *Trends in Ecology and Evolution*, 2001, 16(1): 153-162.
- [29] 吴健, 沙晨燕, 王敏, 等. 典型滨岸草地生态系统碳稳定同位素组成及分布特征. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2231-2238. [WU J, SHA C Y, WANG M, et al. Composition and distribution characteristics of stable carbon isotope in typical riparian grassland ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2231-2238.]
- [30] 贡汉伯. 青藏高原内陆不同生态系统中主要植物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 及非结构性碳水化合物季节性变化特征研究. 兰州: 西北师范大学, 2010. [MU H B. Research on the seasonal characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and non-structural carbohydrate of main plants in different ecosystems in the inland of Qinghai-Tibet Plateau. Lanzhou: Northwest Normal University, 2010.]
- [31] 刘勇丽. 太湖流域水生植物稳定碳氮同位素的生态学研究. 湘潭: 湘潭大学, 2015. [LIU Y L. On the stable carbon and nitrogen isotope ecology of aquatic macrophytes in Lake Taihu watershed. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.]
- [32] 王伟伟. 长江口潮滩营养动态与稳定同位素指示研究. 上海: 华东师范大学, 2011. [WANG W W. Nutrient dynamic and stable isotope indicators in tidal flats of the Yangtze Estuary. Shanghai: East China Normal University, 2011.]
- [33] 陈清, 王义东, 郭长城, 等. 天津沼泽湿地芦苇叶片的碳稳定同位素比值分布特征及其环境影响因素. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1044-1052. [CHEN Q, WANG Y D, GUO C C, et al. Foliar stable carbon Isotope ratios of *Phragmites australis* and the relevant environmental factors in marsh wetlands in Tianjin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(11): 1044-1052.]
- [34] 刘艳杰, 徐宁, 牛海山. 内蒙古草原常见植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 对环境因子的响应. 生态学报, 2016, 36(1): 235-243. [LIU Y J, XU N, NIU H S. Response patterns of foliar $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ to environmental factors for the dominant plants in Inner Mongolia steppe, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 235-243.]
- [35] LI X D, COLES B J, RAMSEY M H, et al. Sequential extraction of soils for multi-element analysis by ICP-AES. *Chemical Geology*, 1995, 124: 109-123.

- [36] 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 等. 鄱阳湖湿地土壤有机碳氮同位素特征及其环境意义. 中国环境科学, 2016, 36(2): 500-505. [WANG M L, LAI J P, HU K T, et al. Compositions of stable organic carbon and nitrogen isotopes in wetland soil of Poyang Lake and its environmental implications. China Environmental Science, 2016, 36(2): 500-505.]
- [37] 曹夏禹, 张翔, 肖洋, 等. 基于稳定碳同位素比的植物水分利用效率分析: 以鄱阳湖湿地为例. 人民长江, 2017, 48(5): 17-20. [CAO X Y, ZHANG X, XIAO Y, et al. Water use efficiency of plants based on stable carbon isotope: Case of Poyang Lake wetlands. Yangtze River, 2017, 48(5): 17-20.]
- [38] 李银凤. 青藏高原高寒牧区土—草—畜—人物质循环过程中稳定碳、氮同位素的分析. 兰州: 兰州大学, 2016. [LI Y F. The analysis of the stable carbon and nitrogen isotopes in the process of soil-grass-livestock-human material circulation on Qinghai-Tibet Plateau alpine pastoral area. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]
- [39] 旺罗, 吕厚远, 吴乃琴, 等. 青藏高原高海拔地区C₄植物的发现. 科学通报, 2004, 49(13): 1290-1293. [LUO W, LYU H Y, WU N Q, et al. Discovery of C₄ plants in high altitude area of Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(13): 1290-1293.]
- [40] 吴敬禄, 林琳, 刘建军, 等. 太湖沉积物碳氮同位素组成特征与环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 25-30. [WU J L, LIN L, LIU J J, et al. Environmental significance and stable isotope signatures from sedimented organic matter in Lake Taihu. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 25-30.]
- [41] FRANZ W. B, GUILLAUME T, SALVADOR N, et al. Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs: A widespread phenomenon. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2005, 19(11): 1381-1391.
- [42] BARDHAN P, KARAPURKAR S G, SHENOY D M, et al. Carbon and nitrogen isotopic composition of suspended particulate organic matter in Zuari Estuary, west coast of India. Journal of Marine Systems, 2015, 141: 90-97.
- [43] ZHANG H J, PENG L, GU B, et al. Effect of trans-reservoir water supply on carbon and nitrogen stable isotope composition in hydrologically connected reservoirs in China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, 35(5): 1117-1126.
- [44] 厉彦玲, 赵庚星. 黄河三角洲典型地区耕地土壤养分空间预测. 自然资源学报, 2018, 33(3): 489-503. [LI Y L, ZHAO G X. Spatial prediction of cultivated land soil nutrients in typical region of Yellow River Delta. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 489-503.]
- [45] 丁喜桂, 叶思源, 王吉松. 黄河三角洲湿地土壤、植物碳氮稳定同位素的组成特征. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 66-71. [DING X G, YE S Y, WANG J S. Stable carbon and nitrogen isotopes in the Yellow River Delta wetland. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(2): 66-71.]
- [46] DOMINGUES T F, MEIR P, SAIZ G, et al. Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa a woodlands. Plant, Cell and Environment, 2010, 33(6): 959-980.
- [47] ASPTSBERGER F, HUBER F, KARGL S. Particulate organic matter dynamics in a river floodplain system: Impact of hydrological connectivity. Archiv Fur Hydrobiologie, 2002, 156(1): 23-42.
- [48] PISANI O, DODDS W K. Characterizing organic matter inputs to sediments of small, intermittent, prairie streams: A molecular marker and stable isotope approach. Aquatic Science, 2016, 78(2): 343-354.
- [49] 魏华, 成水平, 吴振斌. 水文特征对水生植物的影响. 现代农业科技, 2010, 7: 13-16. [WEI H, CHENG S P, WU Z B. Effects of hydrological characteristics on aquatic plants. Modern Agricultural Science and Technology, 2010, 7: 13-16.]
- [50] 杨杰东, 徐士进. 同位素与全球环境变化. 北京: 中国地质出版社, 2007: 72. [YANG J D, XU S J. Isotopes and Global Environmental Change. Beijing: China University of China Press, 2007: 72.]
- [51] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1351-1362. [ZHANG Q D, WEI W, CHEN L D, et al. Spatial variation of soil moisture and species diversity patterns along a precipitation gradient. Journal of Natural Resources, 2018, 33(8): 1351-1362.]
- [52] 王岩, 陈永金, 刘加珍. 黄河三角洲湿地土壤养分空间分布特征. 人民黄河, 2013, (2): 72-74. [WANG Y, CHEN Y J, LIU J Z. Spatial distribution characteristics of soil nutrients in the wetland of the Yellow River Delta. Yellow River, 2013, (2): 72-74.]

- [53] TAL M. Effects of vegetation on channel morphodynamics: Results and insights from laboratory experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(9): 1014-1028.
- [54] 安乐生, 赵全升, 周葆华, 等. 黄河三角洲 NDVI 时空演化特征及其驱动因素. *海洋与湖沼*, 2017, (1): 1-7. [AN L S, ZHAO Q S, ZHOU B H, et al. Temporal and spatial variation characteristics of NDVI and its driving factors in the Yellow River Delta. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, (1): 1-7.]

Distribution characteristics of carbon and nitrogen stable isotopes in wetland components and their relationship with wetland hydrological connectivity

GUO Yu-tong, CUI Yuan, WANG Chen, WANG Qian, XIU Yu-jiao,
XIAO Rong, ZHANG Ming-xiang

(School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the relationship between hydrological connectivity of wetlands and the characteristics of stable carbon and nitrogen isotopes in wetland components (plant, soil and water), hydrological connectivity of typical sites and stable carbon and nitrogen isotopes of plant, soil and water suspended particulate (TSS) samples from the Yellow River Delta were analyzed by field investigation and laboratory analysis. There were significant differences of $\delta^{13}\text{C}$ between the aboveground and underground parts of the studied three plants (*Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Suaeda salsa*) in restored wetlands. The $\delta^{13}\text{C}$ in TSS of restored wetlands was lower than that in tidal wetlands. The hydrological connectivity degree of restored wetlands and tidal wetlands was 0.0520 and 0.0484, respectively. The hydrological connectivity degree among sites was quite different. There was a significant negative correlation between the hydrological connectivity degree and the content of $\delta^{13}\text{C}$ in TSS and aboveground part of plants, which indicated the probable effect of hydrological connectivity on the source of suspended particulate matter in water bodies, as well as the carbon metabolism in plant and plant growth.

Keywords: stable carbon/nitrogen isotopes; wetland components; hydrologic connectivity; Yellow River Delta