

乡村振兴导向的水土资源承载力评价及其优化

璩路路¹, 王永生^{2,3}, 刘彦随^{2,3}, 马晴¹

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 农牧交错区水土资源系统平衡对于保障区域农牧业发展至关重要。以宁夏盐池县为例, 以乡村振兴目标为导向, 运用物元模型开展水土资源系统承载潜力评价, 揭示影响水土资源系统承载力变化的驱动因素, 以及影响水土资源的短缺因素, 探讨乡村地域水土资源失衡的区域分异特征, 以及经济社会与资源生态双重导向的优化路径。结果表明: (1) 盐池县水土资源系统承载力呈叉字型对称空间分布态势, 整体承载力处于中等水平, 具有较大的开发潜力, 其中花马池镇、惠安堡镇的承载能力较高, 麻黄山乡、王乐井乡和大水坑镇的水土资源承载力明显较低。(2) 盐池县乡村地域水土资源耦合协调差异明显, 整体处于拮抗耦合阶段, 镇区耦合协调度较高, 乡村地区则相对较低。(3) 水资源与土地资源利用缺乏同步性, 水资源利用滞后地区应选择水资源适应性管控措施和生态保育+水源涵养的山水林田湖综合体构建, 土地资源利用滞后地区应结合土地工程治理措施与产业结构调整, 推进落实“三主三分”土地资源优化布局。研究结果可为农牧交错区农业转型发展和乡村振兴工程落地提供参考依据。

关键词: 水土资源承载力; 乡村地域系统; 乡村振兴; 人地系统科学; 乡村科学; 盐池县

乡村地域系统是由人文、经济、资源与环境相互联系、相互作用下构成的具有一定结构、功能和区际联系的乡村空间体系。乡村振兴的对象是乡村地域系统, 其核心在于遵循乡村发展规律、实现乡村转型和有效振兴^[1,2], 系统构建乡村地域系统人—地—业耦合格局与创新体系, 科学推进乡村经济、社会、生态、文化、教育、技术体系协调可持续发展, 并致力于解决农业、农村、农民的全局性、系统性问题^[3-6]。乡村水土资源适宜程度、承载强度、协同机制及其耦合过程与情景模拟是乡村振兴研究的前沿课题。土地资源承载力的研究始于1977年FAO进行的发展中国家土地潜在人口支撑能力研究, 随后国家土地管理局、中国科学院地理科学与资源研究所等单位相继开展了不同时空尺度的研究, 引领了中国土地资源承载力的研究热潮^[7,8]。1992年施雅风院士等^[9]首次对“水资源承载力”进行了概念界定, 1997年联合国在《世界水资源综合评价》报告中对此进行扩展^[10], 此后国内兴起了流域和城市地区的水资源承载力研究^[11], 而对于以农牧业为主的半干旱乡村地域水资源承载力的研究较少。乡村地域系统是一个多尺度、多层次、多类型的复杂体系, 在区域空间上分异为省域、市域、县域、乡域、村域等多域系统, 在管理上呈现出多级体系, 在发展层级上表征为圈—带—区多级融合^[2]。乡村地域水土复合

收稿日期: 2019-06-27; 修订日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41931293); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)课题(XDA230703)

作者简介: 璩路路(1991-), 男, 河南孟州人, 博士研究生, 研究方向为土地利用与城乡发展。

E-mail: qululu91@163.com

通讯作者: 刘彦随(1965-), 男, 陕西绥德人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为农业与乡村地理学、城乡发展与土地利用。E-mail: liuys@igsrr.ac.cn

系统内要素间的耦合不断影响着乡村地域空间结构及其水资源的承载能力,改变着乡村地域的人口集聚效应,驱动着乡村的转型发展^[2,12]。水土资源作为乡村地域农业发展的基础因子^[13],两者相互渗透、相互制约。水资源的合理利用影响到土地资源的生产效率^[14],耕地资源的分布也制约着水资源的开发利用方式。水土资源作为一个统一的有机系统,开展乡村地域水土资源承载力的定量研究逐渐成为学者关注的热点。目前关于乡村地域水土资源承载力的定量研究视角和方法主要有干旱化的视角^[15]、供需视角^[16]、多因素综合的仪表板制作视角^[17]、水土资源匹配的视角^[18]、微宏观计算模型^[19]、综合系统分析^[20]以及综合运用粒子群优化算法的投影寻踪模型^[21]等。

以往研究较少关注水土资源系统的相互作用,缺乏水资源内部和土地资源影响的综合考虑以及水土资源支撑下的水土资源复合系统研究,在乡村振兴战略背景下,区域水土资源利用、环境治理、生态保护等面临新的要求。本文界定了水土资源复合系统的概念框架,将水土资源支撑的复合水土资源系统看成一个整体,建立了水土资源系统承载力的评价指标体系。在此基础上,引入物元模型判定综合承载能力,通过投影寻踪的空间转换对其承载力进行验证,并引入灵敏度分析得到各分项因素的影响程度。同时,鉴于水土资源是一个耦合系统,利用耦合协调模型确定水资源和土地资源耦合的滞后因素,借助GIS的分析功能进行空间区划,进一步提出了盐池县乡村振兴导向的水土资源优化路径,以期为农牧交错区农业转型发展和乡村振兴工程落地提供参考依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 面向乡村振兴的水土资源承载力系统框架

承载力原为一个物理量,随着人口、资源和环境问题的日趋严重,承载力概念有了进一步发展。研究较早且较充分的是土地承载力,后引入到资源(水、矿产)领域,研究的领域进一步扩大为人口、经济等并被应用到社会—经济—生态复合系统中^[22]。水土资源是人类赖以生产和生活的基本资料,对区域发展具有基础地位,水土资源利用(承载)是经济进一步发展的基础和前提^[20]。水土资源复合系统是将水土资源支撑的复合系统看成一个整体,可认为是一个水土资源—经济社会—生态环境组成的复合大系统。乡村振兴是以“产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕”为总要求,其目标涵盖经济、生态、文化、社会、社会等各个方面,内涵丰富。乡村振兴的对象是乡村地域系统,本文在研究乡村地域水土资源复合系统的基础上,以乡村振兴为导向,考虑乡村地域系统要素构成,以及水土资源与社会、经济、生态之间的相互关系,从系统的角度解构了乡村地域水土资源承载力。参照复杂系统理论和人地系统科学理论并结合水土复合系统特点^[17],在系统层面涵盖与水土资源系统联系紧密的5个子系统,即水资源系统,土地资源系统,经济系统,社会系统和生态环境系统。通过系统解构,有机整合,遵循“承载力评价—限制因素分析—调控路径优选”的研究逻辑,服务于乡村振兴工程落地,最终实现乡村的健康持续发展(图1)。

北方农牧交错区是我国重要的生态区,其生态实质是农牧两个生态系统的系统主体行为和结构特征在相互过渡过程中,发生“突发转变”的空间域,具有很强的生态环境过渡性和空间波动性。长期以来,生态环境脆弱,其负面影响扩张到两侧的农区和牧区,导致土地荒漠化的蔓延、水资源的枯竭和生态环境质量的下降^[23]。随着一系列国家

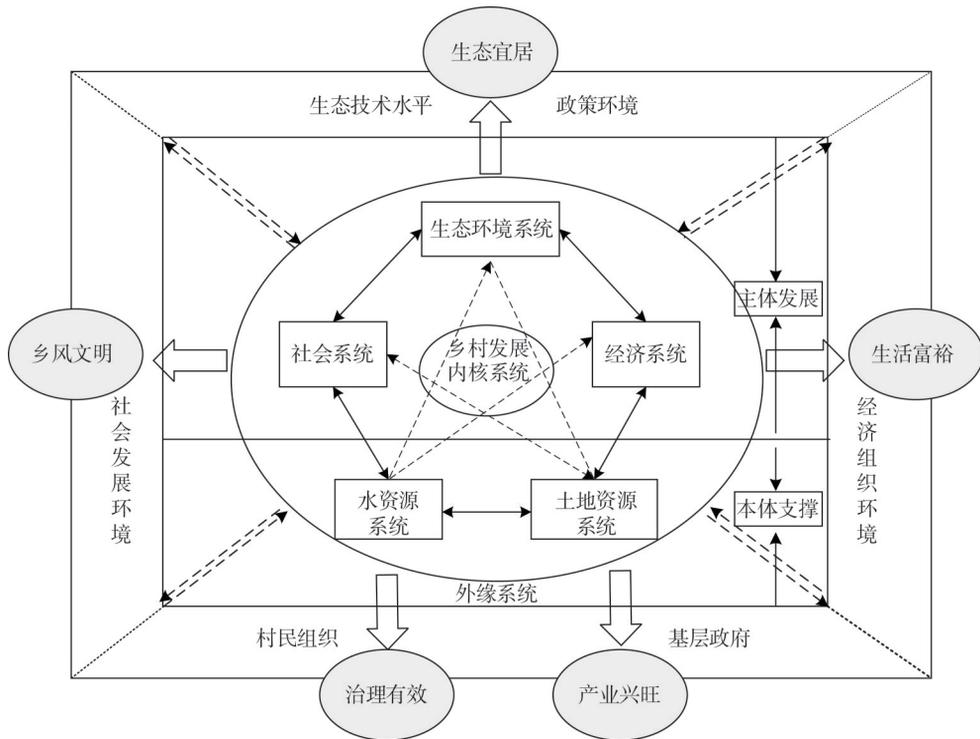


图1 面向乡村振兴的乡村地域水土资源承载力系统解构

Fig. 1 Systematic deconstruction of rural land and water resources for rural revitalization

生态政策的实施，北方农牧交错区的生态环境已得到有效改善。而水土资源是其生态的基础，农牧交错区水土资源耦合的总体目标是在实现水土资源耦合协调的基础上，达到社会经济效益和环境生态效益综合最优，最终实现牧区的可持续发展。本文在识别水土资源系统的基础上，依据水资源、土地资源等的承载能力，并通过有限水资源在生活、生产、生态的合理分配，达到牧区水—土—人—业（畜牧业、种植业等）的动态平衡（图2）。

1.2 模型方法

1.2.1 投影寻踪的物元模型

对于水土资源系统承载力进行综合评价时，由于评价指标较多，涉及变量繁杂，而物元模型能够很好解决复杂问题的不相容性，适合于多因子的评价^[24]，但多项指标是否会影响综合评判结果？本文进一步引入投影寻踪模型^[25]，将高维数据投影到低维空间，通过最优方向的寻求，对研究结果加以验证，因此建立的基于投影寻踪的物元模型是解决该类问题的理想办法。

(1) 物元模型确定关联度

$$R_{(x)} = \begin{cases} \frac{-\rho(V, X_0)}{|X_0|}, & V \in X_0 \\ \frac{\rho(V, X_0)}{\rho(V, X_p) - \rho(V, X_0)}, & V \notin X_0 \end{cases} \quad (1)$$

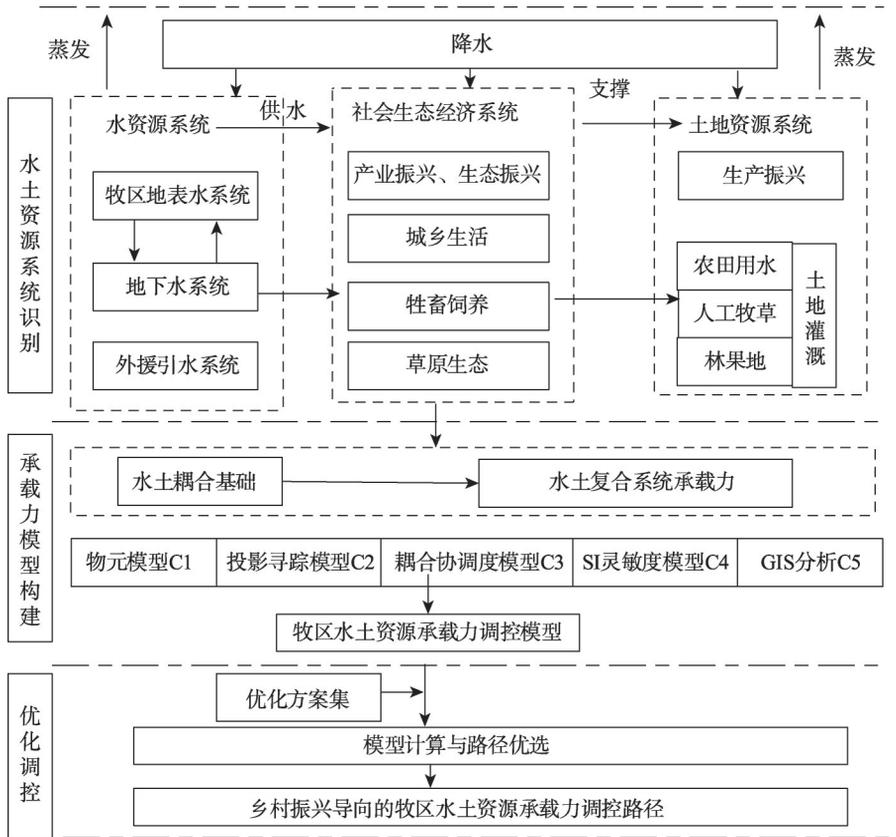


图2 农牧区水土资源承载力调控系统技术框架

Fig. 2 Technical framework of water and land bearing capacity regulation system

$$\begin{cases} \rho(V, X_0) = \left| V - \frac{1}{2}(a + b) \right| - \frac{1}{2}(b - a) \\ \rho(V, X_p) = \left| V - \frac{1}{2}(a_p + b_p) \right| - \frac{1}{2}(a_p - b_p) \end{cases} \quad (2)$$

式中： V 为待评物元的量值； X_0 为经典域物元的量值范围； X_p 为节域物元的量值范围； $\rho(V, X_0)$ 代表点 V 与对应经典域 $X_0=[a, b]$ 的距离； $\rho(V, X_p)$ 为点 X 对应节域之间 $X_p=[a_p, b_p]$ 的距离。

(2) 投影寻踪求得最佳投影方向

$$Z(i) = \sum_{j=1}^m [a(j) \times X(i, j)] \quad (3)$$

$$Q(a) = \sum_i^n [Z(i) - E(Z)]^2 / (n - 1) \quad (4)$$

设样本数据 $X(i, j)$ ($j=1, 2, \dots, m$)是 m 维数据，将其综合成以单位长度向量 $a=\{a(1), \dots, a(m)\}$ ；为投影方向的一维投影值 $Z(i)$ ，投影指标函数 $Q(a)$ 是 $Z(i)$ 的函数， $Q(a)$ 值越大表明投影寻踪寻求单位向量 $a(i)$ 就越大，其中 $E(Z)$ 是 $Z(i)$ 的均值。

1.2.2 耦合协调度模型

耦合度是反映系统发展过程中各参量间协同作用的强弱程度，根据协同论原理，系统走向有序的关键在于各子系统相互之间的协同作用，耦合度正是对协同作用的度量。

本文基于“耦合度”方法，在乡村地域水土复合系统承载力划分的基础上，把水土资源系统和各子系统相互影响、相互作用的程度定义为水土复合系统交互耦合度，利用耦合协调度模型，对乡村地域的水资源系统、土地资源系统、经济系统、社会系统和生态环境系统的耦合协调度进行计算，得出不同乡村地域的水土资源系统承载力的交互耦合协调度^[26]。

(1) 耦合度

$$C = m \left\{ \frac{u_1 \times u_2 \cdots \times u_m}{\prod (u_i + u_j)} \right\}^{1/m} \quad (5)$$

(2) 协调度

$$D = \sqrt{C \times H} \quad (6)$$

式中： C 表示乡村地域水土复合系统各子系统之间的耦合度指数； u_1 、 u_2 、 \cdots 、 u_m 分别表示各子系统的承载力指数； H 表示乡村地域水土复合系统承载力指数； D 表示各子系统的承载力协调程度。

1.2.3 SI模型

为辨识各子系统不同指标对水土资源系统承载能力的作用程度和方向，本文借鉴SI模型。SI模型是指某一输入参数数值的变化对模型输出的影响程度，其计算简便且规避了参数估计的主观不确定性，适合于水土资源复合系统的影响机制分析^[27]，据此将水土资源系统承载力分解为各子系统的函数，构建因素分解SI模型为：

$$\Delta R_{ij} = \frac{S_i(1.1 \times C_{ij}) - W_i(0.9 \times C_{ij})}{W_i(C_{ij})} \ln \left(\frac{S_i}{S_0} \right) \quad (7)$$

式中： R_{ij} 表示第*i*个子系统中第*j*项评价指标的灵敏度； ΔR_{ij} 结果为正，则说明该项指标加大了水土资源系统的承载力，反之则减弱，值的大小反映促进或抑制的程度； W_i 为各子系统所对应的权重； C_{ij} 表示第*i*个子系统中第*j*项评价指标的承载力指数； S_i 表示第*i*个子系统所需要的水资源量； S_0 为指标现值。

1.3 研究区概况

盐池县地处宁夏回族自治区的东部，与毛乌素沙漠南缘接壤，是陕、甘、宁、内蒙古四省（自治区）交界地带，属于典型的农牧交错区。全县总面积8522.2 km²，是宁夏面积最大的县，海拔在1279~1953 m之间，平均海拔1500 m，以麻黄山为界，南部为黄土丘陵区，北部大部分属鄂尔多斯高原。2018年，盐池县共有4乡4镇，102个行政村（图3），总人口17.3万人。农业乡村发展面临的主要问题在于区域性水资源匮乏、地广人稀和生态脆弱。其水资源主要包括扬黄水、地表水（塘坝水）和地下水，且主要依赖扬黄水补给，供给指标难以协调。近年来，盐池县年降水量在

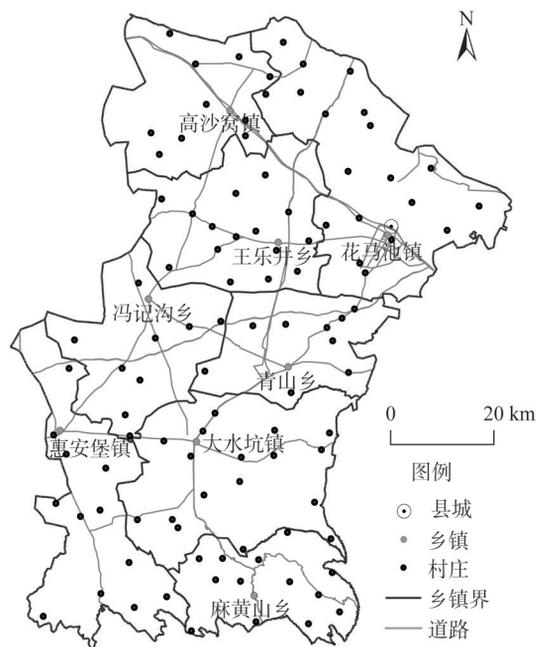


图3 研究区位置及范围

Fig. 3 Location and scope of the study area (Yanchi county)

290 mm左右,而蒸发量是降雨量的6~7倍,干旱成为本地区的突出特点。当前,盐池县亟需破解制约乡村振兴的水土资源耦合与可持续利用的资源、环境和科技问题,发挥盐池县在宁夏乃至西北地区率先精准脱贫、率先乡村振兴、率先全面小康的示范作用^[28,29]。

1.4 数据来源

本文以盐池县的自然资源禀赋和社会经济为基础,开展水土资源系统承载力评价相关研究。水资源量、地表水、井点位、地下水位埋深观测数据、产水系数、供水和用水等数据均来源于盐池县水务局和《盐池县十三五水利发展规划》,其他数据来源于盐池县第二次土地利用调查数据、盐池县第六次人口普查资料提要、各乡镇的政府工作报告以及盐池县政府各个部门,并结合团队2018年12月和2019年3月的两次集中调研,共得到102个行政村的数据,基本覆盖盐池县域。此外,DEM数据来源于国家地理信息中心。

1.5 指标选取

针对牧区地广人稀,水资源缺乏的现状,目前水土资源的研究大多关注在水土资源的合理配置以及将水土资源作为约束条件进行种养殖规模结构的优化研究。广义水土资源复合系统是水资源—土地资源以及与水土资源密切联系的社会、经济以及生态环境组成的复合大系统。本文在研究农牧区水土资源复合系统特点的基础上,综合水土资源系统与社会经济系统、生态环境系统之间的相互关系,基于可操作性、层次性、完备性及区域性原则,根据盐池县实际情况,参考其他学者的相关研究成果^[21,26,30],同类型地区的评价标准和半干旱农牧交错区水土资源开发利用水平,制定了本文的评价准则。

2 结果分析

2.1 盐池县水土资源系统承载力评价

根据2018年水土资源系统承载力指标建立水土复合系统矩阵,并根据各指标权重,计算各地区评价指标关联度,得到水土资源系统承载力空间区划图(图4)。根据计算结果,2018年盐池县水土资源系统承载综合关联度为0.39,水土资源系统承载空间差异较大,具体为“东北和西南高,西北和东南低”又字型对称的空间特点。八个乡镇中花马池镇承载力较大,处于较高水平;麻黄山乡、王乐井乡和大水坑镇承载力较低,通过比较分析,水土资源系统承载力处于低值的区域,其社会经济也表现为较低的发展水平,在一定时空尺度上,间接说明了水土资源对于经济社会发展的支撑作用。因此在分析水土资源系统承载力影响因素时社会经济的影响也应纳入系统的考虑范围。

根据构建的盐池县水土资源系统承载

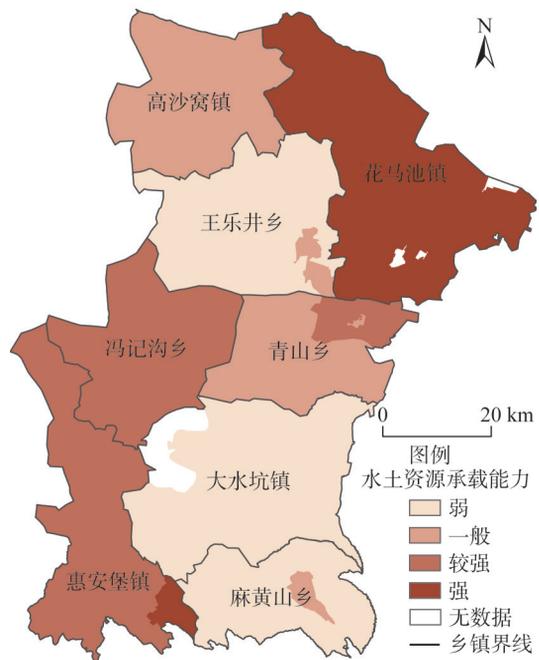


图4 盐池县水土资源承载能力空间区划
Fig. 4 Spatial division of water and land resources carrying capacity in Yanchi county

表1 乡村振兴的水土资源系统承载力评价指标与评价标准

Table 1 Evaluation indicators and criteria of water and land resources bearing capacity for rural revitalization

系统	准则层	振兴 维度	指标层	弱 V级	较弱 IV级	一般 III级	较强 II级	强 I级
水资源系统A	水资源利用	L	A11 人均供水量/(m ³ /人)	<200	>200~400	>400~600	>600~800	>800
		I	A12 耕地灌溉率/%	0~10	>10~20	>20~50	>50~60	>60~100
	A1	I	A13 地下水开采难易度	0~0.2	>0.2~0.4	>0.4~0.6	>0.6~0.8	>0.8~1
		LI	A14 人畜供水率/%	0~10	>10~20	>20~40	>40~60	>60~100
	A2	E	A15 生态环境用水率/%	<50	50~60	60~70	70~80	>80
		I	A16 工业重复用水率/%	<55	55~65	65~75	75~85	>85
土地资源系统B	水资源禀赋	L	A21 人均水资源量/(m ³ /人)	<300	>500~600	>600~1000	>1000~1500	>1500
		LI	A22 地表水系数/%	0~17	>17~25	>25~32	>32~40	>40
土地资源系统B	土地资源禀赋	LI	B11 人均耕地面积/(亩/人)	0~5	>5~12	>12~20	>20~50	>50
		LI	B12 水耕协调度/%	0~10	>10~50	>50~100	>100~200	>200
	B2	I	B21 耕地利用程度/%	0~20	>20~50	>50~70	>70~90	>90
		L	B22 村庄用地占比/%	0~0.1	>0.1~0.15	>0.15~0.2	>0.2~0.3	>0.3
		GI	B23 节水灌溉率/%	<20	>20~30	>30~40	>40~50	>50
B2	EI	B24 草地覆盖率/%	<10	>10~20	>20~30	>30~40	>40	
	GI	B25 耕地产出效益/(万元/hm ²)	0~1	>1~2	>2~3	>3~5	>5	
社会系统C	人口结构	L	C11 人口密度/(人/km ²)	>50	>20~50	>10~20	>5~10	<5
		GI	C12 人口增长率/%	>15	>10~15	>6~10	>2~6	<2
经济系统D	生活水平	L	C21 农村生活用水定额/[m ³ /(d·人)]	>110	80~110	50~80	20~50	<20
		LI	D11 人均GDP/万元	<0.5	0.5~1	>1~3	>3~5	>5
D1	D1	I	D12 工业产值模数/(万元/km ²)	<0.5	0.5~1	>1~3	>3~5	>5
		I	D21 第一产业比例/%	>50	>30~50	>15~30	>8~15	>0~8
D2	D2	GI	D22 水利工程投资率/%	0~5	>5~20	>20~30	>30~60	>60
		GE	E11 水土保持率/%	<60	>60~70	>70~80	>80~90	>90
生态环境系统E	生态本底	I	E12 干旱指数(无量纲)	>15	>10~15	>8~10	>5~8	>0~5
		E	E21 植被覆盖率/%	0~20	>20~30	>30~50	>50~70	>70
E2	E2	EI	E22 牲畜超载率/%	>20	>10~20	>3~10	>0~3	<0

注：振兴维度：产业兴旺(I)生态宜居(E)乡风文明(C)治理有效(G)生活富裕(L)；C21农村生活用水定额参照宁夏回族自治区有关行业用水定额的通知，宁政办发[2014]182。

力的五维26项指标(表1)，通过原始指标的归一化处理，构建一维的投影指标函数，运用PSO优化算法求得最佳投影，代入式(2)，得到最佳投影值(图5)。结果显示最佳投影值最大的为惠安堡镇0.419，最小的为麻黄山乡0.231，即盐池县水土资源系统承载力大小排序依次为惠安堡镇>青山乡>花马池镇>王乐井乡>冯记沟乡>高沙窝镇>大水坑镇>麻黄山乡，与基于寻踪投影模型得到的最佳投影值与物元模型分级标准基本吻合，从总体上判定了各地域的水土资源系统承载力等级，并对八个乡镇的承载能力进行了排序。对比可知，王乐井乡寻踪投影的评价结果较高，在最佳投影要素上其发展优势凸显，间接说明其水土资源系统承载空间具有较大能力或潜力，其他乡镇的评价结果皆与物元模型的评价一致。

2.2 水土资源系统承载力影响因素弹性分析

在确定水土资源系统承载能力等级基础上，采用灵敏度分析对影响水土资源系统承载力各个层面的因子进行定量分析，得出评价指标对各个子系统的影响程度，以及各个子系统与其系统内指标的敏感程度（图6）。结果表明水资源本身对于评价指标的影响最大。盐池地处半干旱地区，水资源短缺，水资源是制约经济社会以及生态可持续发展的关键性因素；其次为土地资源系统和社会系统。在水土资源复合系统中，水土资源的支撑作用在半干旱农牧区是较为敏感的因素。

进一步对分项指标分析，水资源系统中主要影响因子指标依次为人均水资源量、地下水开采难易度、人畜供水率、耕地灌溉率、工业重复用水率、地表水系数、生态环境用水率和人畜供水率，土地资源系统中的耕地利用程度和社会系统中的乡村人口密度分别对土地资源系统和社会系统的影响弹性明显。盐池县的采矿、石油、石膏等工业规模较大，工业用水量可观，但盐池县以农田灌溉和滩羊养殖的农牧业用水占全部水量的84.71%，因此，第一产业比例是影响经济系统承载能力的关键性指示指标。在生态环境系统中，由植被覆盖率（因子1）及干旱指数（因子2）所反映的盐池县林草场退化是影响生态环境承载力的敏感性因子。

2.3 水土资源耦合分析

水土资源禀赋是探究水土资源协调的前提和基础，水土资源的利用与其耦合程度息息相关，间接决定水土资源的承载潜力。为深入探究水土资源的交互影响，分别对水土资源禀赋和水土资源利用程度进行耦合分析，并与水土资源系统的耦合度进行对比分析，进而揭示水土资源耦合发展的因素差异。由耦合协调理论，得出盐池县各乡镇尺度的耦合协调度（图7），并绘制区划图（图8），为水土资源耦合的尺度下移至村域进行比照。

整体上盐池县水土资源耦合处于拮抗阶段，水土资源目前处于相互制约的阶段，较

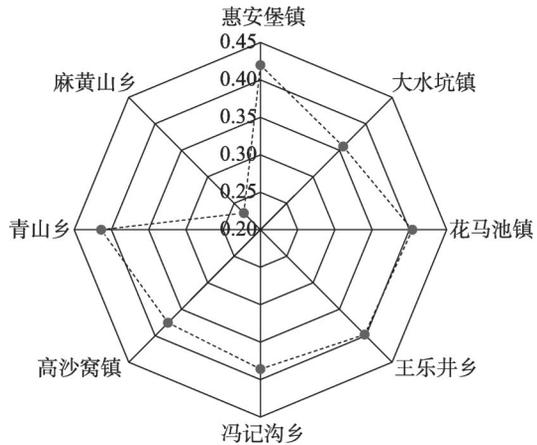
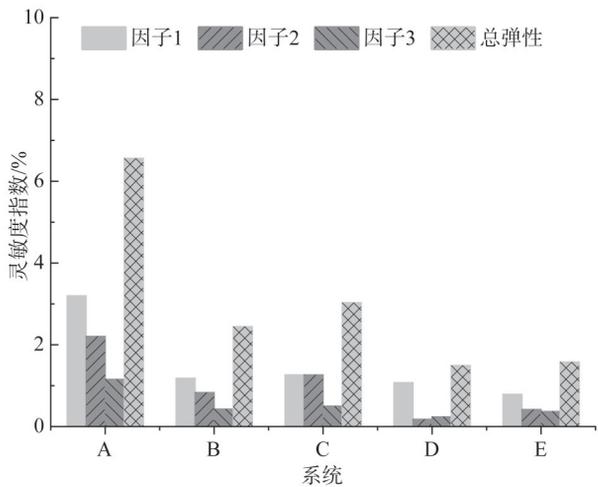


图5 盐池县水土资源承载力最佳投影值
Fig. 5 Optimum projection value of water and land resources bearing capacity in Yanchi county



注：A、B、C、D、E含义见表1，敏感因子矩阵如下：A (A21, A13, A14)；B (B21, B11, B23)；C (C11, C22, C12)；D (D21, D11, D12)；E (E21, E12, E11)。

图6 盐池县水土资源系统敏感度指数状况
Fig. 6 State of sensitivity index of water and land resources system in Yanchi county

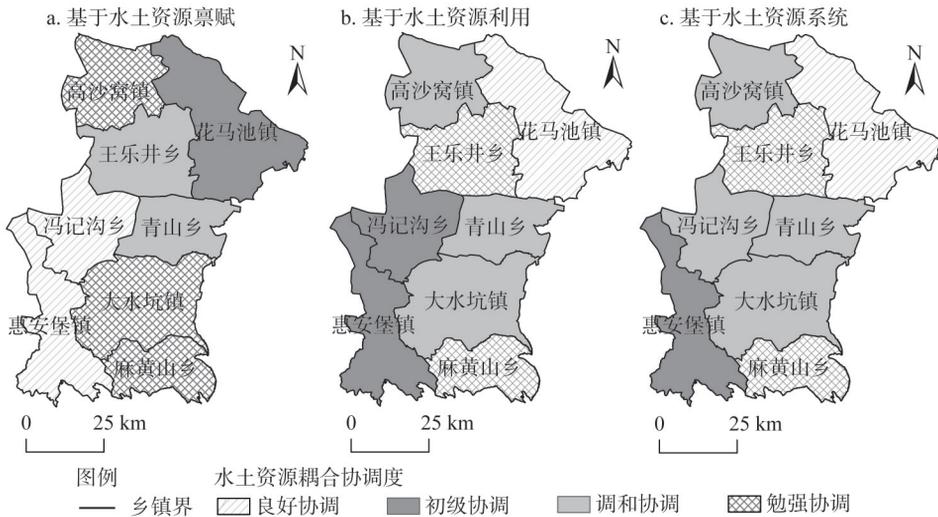


图7 盐池县水土资源耦合度评价

Fig. 7 Evaluation of coupling degree of water and land in Yanchi county

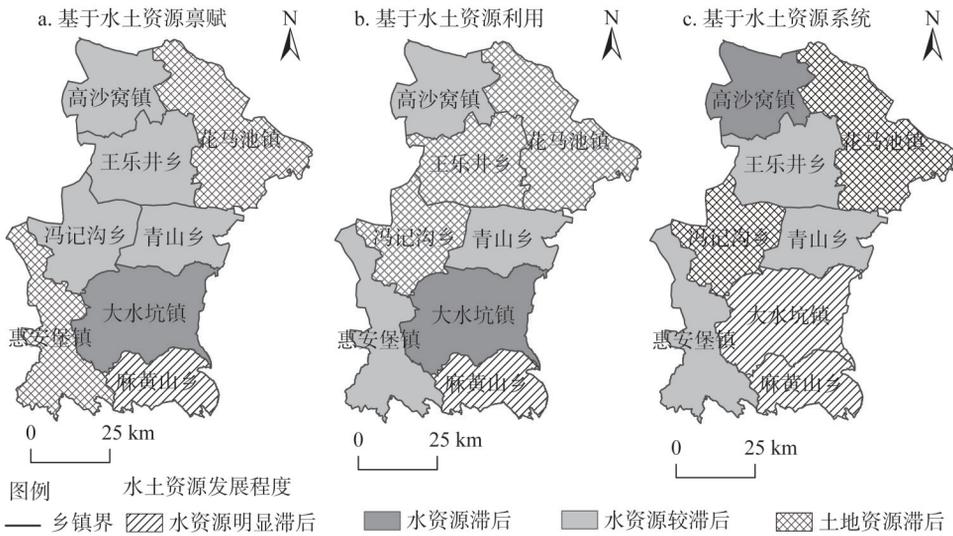


图8 基于水土资源耦合的盐池县水土资源发展程度区划

Fig. 8 Land and water resources development degree division of Yanchi county based on coupling of water and land

为符合盐池县地处干旱区，地广人稀的现实状况。从区域之间的协调度来看，花马池镇和惠安堡镇处于高度协调，尤其是花马池镇水土资源的协调等级较高，其他乡镇均处于中度协调，而王乐井乡和麻黄山乡为勉强协调，可见这两个乡镇要尤其注重水土资源开发的平衡。从耦合类型来看：(1) 资源禀赋方面：麻黄山乡水资源明显滞后，大水坑镇水资源较滞后，土地资源滞后的是花马池镇和惠安堡镇。(2) 资源利用方面：麻黄山乡和大水坑镇处于水资源利用明显滞后水平，花马池镇、王乐井乡和冯记沟乡均为土地资源滞后。(3) 资源系统：麻黄山乡和大水坑镇仍处于水资源利用明显滞后水平，花马池

镇和冯记沟乡均为土地资源滞后。可见，水土资源禀赋和水土资源利用与水土资源系统的协调息息相关，盐池县水土资源协调状况应在水土资源禀赋的前提下，亟需水土资源利用方式的转型。

2.4 水土资源优化路径选择

2.4.1 水资源滞后区优化路径

盐池县水资源分布的稀缺性、空间异质性以及降水年季变化的动态性及不确定性，构成了当地水资源高效管理的巨大约束，特别是南部丘陵沟壑区，水资源明显低于盐池县平均水平，通过水资源的适应性管理，达到节约水资源的目的。盐池县传统是以小杂粮为主导，而在盐池滩羊养殖的畜牧业发展背景下，通过结构调整、种牧草饲料等低耗水要素的替代，采取“经济社会”和“资源生态”的双重导向优化路径（图9），改变地域水资源的劣势，促进水土资源的耦合。

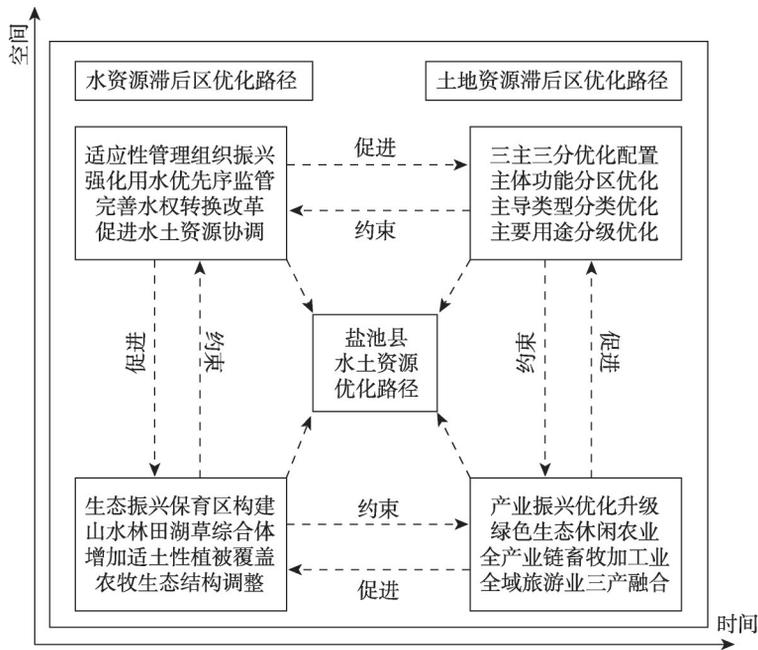


图9 乡村振兴导向的盐池县水土资源开发优化路径

Fig. 9 Optimized path of water and land resources development in Yanchi county for rural revitalization

水土资源禀赋耦合协调程度处于高度和中度协调的冯记沟乡、惠安堡镇、花马池镇、王乐井乡和青山乡，水资源能基本满足工农业生产和生活的需求，以防治为主。处于勉强协调和轻度不协调的大水坑镇、高沙窝镇和麻黄山乡，应加大农林水投资，在保证生产总值增长的同时，提高用水效率，扩大节水灌溉面积，并适度提高水库大坝的蓄水能力。水土资源利用耦合方面，盐池县水土资源利用基本上均在中度协调水平以上，但其水资源利用滞后较为明显，尤其是大水坑镇、高沙窝镇和麻黄山乡，且干旱指数和水土保持率处于低级等别，因此应首先从提高日常产出用水率方面着手，节约水资源利用。在水土资源系统耦合方面，水资源系统短缺问题较严重，应通过加强资源管理，使耗水型经济结构向节水型经济结构转变，根据地区特点种植低耗水作物，并采取节水灌溉措施。特别是水资源短缺的麻黄山乡，水土流失严重，水资源系统指标明显低于盐池

县平均水平,在缺水情况下,应重视用水效率,还应加强区域间水资源调配,适当借用其他地区的水资源。构建生态保育区,提高节水能力,在哈巴湖等自然保护区附近,通过生态保育等职能的发挥,达到涵养水源的目的。生态保育区也是构建农牧交错带“山水林田湖草”生命共同体和打造田园综合的内在要求。当前国家提出美丽中国战略,美丽中国的前提是解决生态化问题,实则上,绿色化、生态化是其主旋律,因而,生态保育区的构建是提升水土资源系统承载力的有效方法。

2.4.2 土地资源滞后区优化路径

半干旱农牧草原区常年干旱少雨,生态环境脆弱,水土资源系统承载能力是维系牧区社会、经济及生态系统协调一致可持续发展的关键。土地资源滞后的冯记沟乡、花马池镇和惠安堡镇,可适当增加耕地面积,统筹村庄、牧草地比例和农业灌溉用水量,做到物尽其用,同时应注重土地利用类型与种植结构优化,并平衡外出务工和在家务农人口数量。水资源禀赋条件有限的背景下,土地资源协调滞后区应适当调整耐旱作物种植比例,关停高耗水企业,改进节水工艺,增加饲草料地的建设规模是实现水资源高效利用、牧区社会经济快速发展的重要途径。

针对土地资源滞后地区的发展现状,通过三主三分^[30](主体功能分区,主导类型分类,主要用途分级)的重心下沉(从县域到乡镇的下沉),基本单元下移(从乡镇到村域的下移),划定村镇空间的主体功能区,优化土地资源的配置。按照主体功能的学理思想,突破行政界线,进行地域内部功能的细化,达到主体功能分区的目的;土地资源滞后区内还有不同的主导类型,通过土地利用图分出林地、草地等,将不同功能划分在不同的类型上;对于同一种类型,如居民区、社区、重点镇、中心村,是有等级的差别的,依据不同类型的主要功能,按照居业协同、聚落的关系,分门别类进行等级的划分,如居住、林业保护、文化的保护、社会治理等。通过三主三分优化配置,理清土地资源滞后型地区的用地关系,最终实现土地资源优化布局。其次,乡村地域是一个广阔的区域,不仅是服务城市的,乡村地域本身具有一套成长的机制,一个地区乡村的振兴潜力,取决于居业协同的能力,水土协调是居业协同的基础,土地是产业的载体,在土地资源滞后区域,通过土地资源的利用与改造,探索耕地资源从粮食作物到饲料作物的一季变两季的业态调整;对于北部沙化比较严重的高沙窝镇和王乐井乡,通过黏土和沙化土复配以及种植柠条等防沙植被的土地治理措施,达到沙化土地的改良;而南部大水坑镇和麻黄山乡的部分盐碱地可以采用工程措施,通过土地的挖潜垫高,达到降低地下水的目的。

3 结论与讨论

3.1 结论

基于乡村振兴目标导向,对盐池县乡村地域水土资源承载能力进行了评判和对比,通过利用弹性模型找寻影响水土资源复合系统的分项子系统的敏感因子,利用耦合协调模型分析了水土资源发展失衡的滞后因素,并结合GIS地理信息软件分析乡村地域水土资源失衡的区域分异,得出以下主要结论:

(1) 本文构建的半干旱农牧交错区水土资源承载能力评价指标与分级标准,能够较好地反映盐池县水资源和土地资源实际,较好地契合经济系统、社会系统和生态环境系统

现状。盐池县水土资源系统承载力呈叉字型对称空间分布态势,整体承载力处于中等水平,具有较大开发潜力,其中,花马池镇、惠安堡镇的承载能力较高,麻黄山乡、王乐井乡和大水坑镇的水资源承载力明显较低。高沙窝镇土地资源条件良好,水资源发展滞后,引起水土资源系统承载力降低。

(2) 弹性灵敏度分析结果表明水资源系统、社会系统和土地资源系统是影响水土资源系统承载能力较为敏感的支撑子系统。2018年盐池县乡村地域水土资源耦合协调差异明显,整体处于拮抗耦合阶段,水资源与土地资源发展缺乏同步性,整体上镇区耦合协调度较高,乡村地区则相对较低,据此提出水土资源的双重优化路径,为实现水土资源的协调发展提供参考与借鉴。

(3) 在水资源滞后地区,根据乡村五大振兴的战略导向,应选择水资源适应性管理制度组织振兴,生态振兴保育区构建及结合水源涵养的山、水、林、田、湖综合体构建,有效促进产业融合、产业振兴发展,而土地资源滞后地区应结合土地工程治理措施与产业结构调整,推进落实“三主三分”土地资源优化布局。

3.2 讨论

本文分析了水资源内部和土地资源的影响,但土地资源的重点是在土地利用类型结构与格局优化,而土地系统是一个立体的复杂巨系统^[31],不仅涵盖土地资源的类型、数量、空间分布和利用方式,还包括土壤质量、水文条件等。未来应加强水土资源耦合协调机理研究及生态水文过程模拟,推进乡村振兴规划中水土关键问题解决方案的协同落实,为乡村振兴愿景目标的实现提供理论支撑。

乡村振兴是新时代国家重大战略,摸清水土资源利用状况及其承载力,是乡村产业发展、生态宜居、乡村治理等措施落地的前提。本文从水、土地等系统要素入手,构建了乡村振兴导向的水土资源承载力系统框架,开展了面向乡村振兴的水土资源承载力评价研究,所得结论与既有研究基本一致^[32],并提出适应性对策。水土资源系统的引入能够为评价乡村水土资源系统承载力提供支撑,但本文建立的指标体系是否具有普适性,尚待后续其他地区的进一步验证。基于水土资源系统视角的承载力评价方法适用于更为精细的描绘承载力分异格局研究,能够为区域乡村工程落地见效^[13,33]、乡村振兴规划^[34,35]等提供参考。但乡村振兴除涉及水土资源等自然要素外,还涉及体现乡风文明、文化、人才等人文要素。未来将结合调研数据和统计资料,进一步提取水土资源支撑下的新型经营主体、生态治理与生态产业化,以及产业相关研究,利用乡村人地系统科学原理与方法,深入探讨乡村振兴工程管理、三生结合、三产融合等内容,提出实现乡村地域系统“人—地—业—财”要素耦合与可持续发展的可行对策。

新时期乡村振兴应以水土资源承载力、人地系统协调为基础,以激活乡村人—地—业要素活力和内生动力为抓手,以提升乡村地域系统可持续性能力和竞争力为目标,创新发展具有地域特色的乡村科学理论—技术—管理一体化发展体系,构筑中国的乡村科学^[2,36,37]。在联合国2030年可持续发展目标下,研究推进水土资源支撑下的乡村转型、重塑城乡关系、实现城乡融合与可持续发展长远战略,为实现2035年乡村振兴目标提供科技支撑。

参考文献(References):

- [1] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650. [LIU Y S. Research on the urban-ruralinte-

- gration and rural revitalization in the New Era in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650.]
- [2] 刘彦随. 新时代乡村振兴地理学研究. *地理研究*, 2019, 38(3):461-466. [LIU Y S. Research on the geography of rural revitalization in the New Era. *Geographical Research*, 2019, 38(3):461-466.]
- [3] LIU Y S. Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, 2018, 74(5): 1-4.
- [4] LIU Y S, FANG F, LI Y H. Key issues of land use in China and implications for policy making. *Land Use Policy*, 2014, 40(4): 6-12.
- [5] BAI X M, SHI P J, LIU Y S. Realizing China's urban dream. *Nature*, 2014, 509(7499): 158-160.
- [6] LIU Y S, LI Y H. Revitalize the world's countryside. *Nature*, 2017, 548(7667): 275-277.
- [7] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 3-17. [FENG Z M, LI P. Origin and development of the concept of bearing capacity: Discussions from the perspective of resources and environment. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 3-17.]
- [8] LIU Y S, LI J T, YANG Y Y. Strategic adjustment of land use policy under the economic transformation. *Land Use Policy*, 2018, 74(5): 5-14.
- [9] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载能力及其合理利用. 北京: 科学出版社, 1992: 18-30. [SHI Y F, QU Y G. *Water Resources Carrying Capacity and Rational Utilization in Urumqi River Basin*. Beijing: Science Press, 1992: 18-30.]
- [10] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨. *地理学报*, 2010, 65(1): 82-90. [DUAN C Q, LIU C M, CHEN X N. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 82-90.]
- [11] 张永勇, 夏军, 王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨. *地理科学进展*, 2007, 26(2): 126-132. [ZHANG Y Y, XIA J, WANG Z G. Research on regional water resources carrying capacity theory and method. *Progress in Geography*, 2007, 26(2): 126-132.]
- [12] 李琳娜, 璩路路, 刘彦随. 乡村地域多体系统识别方法及应用研究. *地理研究*, 2019, 38(3): 563-577. [LI L N, QU L L, LIU Y S. Research on identification method and application of rural regional multi-body system. *Geographic Research*, 2019, 38(3): 563-577.]
- [13] LIU Y S, ZHENG X Y, WANG Y S, et al. Land consolidation and modern agriculture: From soil particles to agricultural systems: A case study of Yulin city, Shaanxi province. *Journal of Geography*, 2018, 28(12): 1896-1906.
- [14] 潘争伟, 金菊良, 刘晓薇, 等. 水资源利用系统脆弱性机理分析与评价方法研究. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1599-1609. [PAN Z W, JIN J L, LIU X W, et al. Study on mechanism analysis and evaluation method of vulnerability of water resources utilization system. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1599-1609.]
- [15] 文琦, 刘彦随. 北方干旱化对水土资源与粮食安全的影响及适应: 以陕北地区为例. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(7): 7-11. [WEN Q, LIU Y S. Impact and adaptation of drought on water and soil resources and food security in Northern Shaanxi province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(7): 7-11.]
- [16] WU L, SU X L, MA X Y, et al. Integrated modeling framework for evaluating and predicting the water resources carrying capacity in a continental river basin of Northwest China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204: 366-379.
- [17] LANE M, DAWES L. Carrying Capacity Dashboard Analyses: Australian Case Studies of Populations Scaled to Place. Germany: *Urban Environment*, 2013: 27-37.
- [18] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局. *地理学报*, 2006, 61(8): 847-854. [LIU Y S, GAN H, ZHANG F G. Analysis of the matching patters of land and water resources in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 847-854.]
- [19] 任守德, 付强, 王凯. 基于宏观尺度的三江平原区域农业水土资源承载力. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 8-14. [REN S D, FU Q, WANG K. Regional agricultural water and soil resources carrying capacity based on macro-micro scale in Sanjiang Plain. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 8-14.]
- [20] 王介勇. 我国东部地区农村发展的水土资源基础及其优化调控. 北京: 中国科学院研究生院, 2008. [WANG J Y. *Land and water resource base for Rural Development and their optimal use in Eastern China*. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008.]
- [21] 李慧, 周维博, 庄妍, 等. 延安市农业水土资源匹配及承载力. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 156-162. [LI H, ZHOU W

- B, ZHUANG Y, et al. Matching and carrying capacity of agricultural water and soil resources in Yan'an city. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(5): 156-162.]
- [22] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11. [CAO Z, MIN Q W, LIU M C, et al. Ecosystem-service-based ecological carrying capacity: Concept, content, assessment model and application. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 1-11.]
- [23] 刘彦随, 陈宗峰, 李裕瑞, 等. 黄土丘陵沟壑区饲料油菜种植试验及其产业化前景: 以延安治沟造地典型项目区为例. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 69-78. [LIU Y S, CHEN Z F, LI Y R, et al. The planting technology and industrial development prospects of forage rape in the loess hilly area: A case study of newly-increased cultivated land through gully land consolidation in Yan'an, Shaanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 69-78.]
- [24] 蔡文. 物元模型及其应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 10-27. [CAI W. Matter-element Model and Its Application. Beijing: Science and Technology Literature Publishing House, 1994: 10-27.]
- [25] 邓楚雄, 谢炳庚, 李晓青, 等. 基于投影寻踪法的长株潭城市群地区耕地集约利用评价. *地理研究*, 2013, 32(11): 2000-2008. [DENG C X, XIE B G, LI X Q, et al. Evaluation of intensive cultivated land use in Changsha-Zhuzhou-Tan Urban Agglomeration based on projection pursuit method. *Geographical Research*, 2013, 32(11): 2000-2008.]
- [26] 李裕瑞, 王婧, 刘彦随, 等. 中国“四化”协调发展的区域格局及其影响因素. *地理学报*, 2014, 69(2): 199-212. [LI Y R, WANG J, LIU Y S, et al. Spatial pattern and influencing factors of the coordination development of industrialization, informatization, urbanization and agricultural modernization in China: A prefecture level exploratory spatial data analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(2): 199-212.]
- [27] 龙胤慧, 郭中小, 廖梓龙, 等. 基于水资源承载能力的达茂旗牧区用水方案优化. *地理科学*, 2015, 35(2): 238-244. [LONG Y H, GUO Z X, LIAO Z L, et al. Water use scheme optimization of Damaoqi Pastoral Area based on water resources carrying capacity. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(2): 238-244.]
- [28] 李裕瑞, 卜长利, 曹智, 等. 面向乡村振兴战略的村庄分类方法与实证研究. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 243-256. [LI Y R, BU C L, CAO Z, et al. Village classification system for rural vitalization strategy: Method and empirical study. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 243-256.]
- [29] 璩路路, 李裕瑞, 刘彦随. 基于村镇空间“物一场”模型的乡村聚落布局优化研究. *经济地理*, 2019, 39(4): 174-181. [QU L L, LI Y R, LIU Y S. Study on layout optimization of rural settlements based on the "substance-field" model of villages and town space. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 174-181.]
- [30] 刘彦随, 王介勇. 转型发展期“多规合一”理论认知与技术方法. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 529-536. [LIU Y S, WANG J Y. Cognition and technical methods of "multi-conformity" theory in the period of transformation and development. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 529-536.]
- [31] 刘彦随. 土地综合研究与土地资源工程. *资源科学*, 2015, 37(1): 1-8. [LIU Y S. Land comprehensive research and land resources engineering. *Resource Science*, 2015, 37(1): 1-8.]
- [32] 安祎玮, 周立华, 杨国靖, 等. 宁夏盐池县相对资源承载力. *中国沙漠*, 2017, 37(2): 399-406. [AN Y W, ZHOU L H, YANG G J, et al. Relative resource carrying capacity of Yanchi county, Ningxia. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(2): 399-406.]
- [33] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案. *地理学报*, 2018, 73(2): 203-218. [LIU Y S, ZHANG Z W, WANG J Y. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 203-218.]
- [34] 王介勇, 周墨竹, 王祥峰. 乡村振兴规划的性质及其体系构建探讨. *地理科学进展*, 2019, 38(9): 1361-1369. [WANG J Y, ZHOU M Z, WANG X F. Features and framework of rural revitalization planning system. *Progress in Geography*, 2019, 38(9): 1361-1369.]
- [35] 刘彦随. 中国乡村振兴规划的基础理论与方法论. *地理学报*, 2020, 75(6): 1120-1133. [LIU Y S. The basic theory and methodology of rural revitalization planning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1120-1133.]
- [36] 刘彦随, 冯巍仑, 李裕瑞. 现代农业地理工程与农业高质量发展: 以黄土丘陵沟壑区为例. *地理学报*, 2020, 75(10): 2029-2046. [LIU Y S, FENG W L, LI Y R. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high-quality development: Case study of loess hilly and gully region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2029-2046.]
- [37] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. *地理科学*, 2020, 40(8): 1221-1234. [LIU Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234.]

Evaluation of water and land resources system bearing capacity and path optimization for rural revitalization

QU Lu-lu¹, WANG Yong-sheng^{2,3}, LIU Yan-sui^{2,3}, MA Qing¹

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The balance of water and land resources system in pastoral ecotone is the guarantee for the development of regional farming and animal husbandry. Taking Yanchi county of Ningxia as an example, this paper evaluates the carrying capacity of water and land resources based on matter element model and studies the driving factors affecting the change of carrying capacity of water and land resources, analyses the factors affecting the carrying capacity of water and land resources and their regional differences, and explores the optimization path of dual guidance of economy and society as well as resources and ecology. The results show that: (1) The carrying capacity of water and land resources of Yanchi county presented a symmetrical X-shaped pattern at a medium level and had great potential for development. Huamachi and Hui-anpu had higher carrying capacity, while Mahuangshan, Wanglejing and Dashuikeng had the lower. (2) There were obvious regional differences in the coupling and coordination of water and land resources in rural areas of Yanchi county in 2018, and the whole study area was in the antagonistic coupling stage. The coupling and coordination degree of towns was relatively high, while that of rural areas was relatively low. (3) There is a lack of synchronization between water resources and land resources utilization. Water resources lagging areas should take water resources adaptive management and control measures and "ecological conservation + water conservation" to protect mountains, rivers, forests, farmlands and lakes in a coordinated way. Land resources utilization lagging areas should actively explore the main function-oriented zoning, dominant type classification and principal purpose classification optimal distribution strategy of land resources in farming and animal husbandry space in combination with land engineering control measures and industrial restructuring. The strategy of synchronous optimization of resources use, ecological protection and socio-economic development based on the balance of water and land resources in rural areas of Yanchi county provides research reference for the development of agricultural transformation and the implementation of rural revitalization program in the pastoral ecotone.

Keywords: water and land resources carrying capacity; rural regional system; rural revitalization; human-earth system science; rural science; Yanchi county