

青藏高原农牧业生态风险时空变化特征与分区防控

聂倩文^{1,2}, 何理^{1,3}, 殷闯¹, 唐孟¹, 田沛佩^{1,2}, 卢宏伟²

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102200; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 天津大学建筑工程学院水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300000)

摘要: 青藏高原地区是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地, 农牧业是青藏高原涵盖范围最广的产业, 明晰其生态风险对实现青藏高原农牧业可持续发展具有重要意义。构建了青藏高原农牧业生态风险评价体系, 并以216个县域为评价单元, 分析1990—2015年农牧业开发综合生态风险的时空分布及其重心转移规律, 并结合区域农牧业开发强度实现农牧业生态风险权衡分区。结果表明: (1) 青藏高原综合生态风险总体有上升趋势, 呈“东部多核聚集、西部零星散列”的分布格局。(2) 风险重心向西北方向移动, 风险主趋势方向转为西北—东南走向。(3) 青藏高原限制开发区面积占比最大为50.84%, 其次为发展预警区与自然恢复区, 青藏高原整体农牧业开发强度较高, 应在保障高原生态安全屏障功能的情况下减缓农牧业开发。针对区域特征提出农牧业发展方案, 以期对青藏高原地区农牧业开发生态风险防范及发展规划提供科学指引。

关键词: 生态风险分析; 时空分布; 风险重心转移; 农牧业风险分区; 青藏高原

青藏高原是地球上海拔最高的高原, 被称为“世界屋脊”和“亚洲水塔”^[1]。高原地形复杂多样, 气候寒冷少雨, 生态环境脆弱, 高寒草甸发育, 使得农牧业成为当地的主要经济方式之一^[2]。科学认识高原地区农牧业发展的生态风险是保证高原生态安全屏障功能稳定与提升的科学基础。

区域生态风险评价需在区域尺度上考虑自然灾害、气候变化与人类活动等多风险源, 确认区域脆弱性分布状况并进一步识别风险受体等, 综合多方面评价结果得出区域最终风险水平并体现其时序特征与空间异质性^[3]。目前对生态风险进行科学评估已成为地理学与生态研究的热点方向, 从评估方法上看, 不同领域的学者运用商值法^[4]、评价指标体系法^[5]、脆弱性评价法^[6]以及模型法^[7]进行多角度的生态风险评价。就青藏高原而言, 周伟等^[8]以青藏高原典型农牧区扎囊县为研究区选取区域内自然灾害为风险源展开生态风险综合评价; 于伯华等^[9]通过分析青藏高原生态系统脆弱性的形成机制并建立三层指标体系对青藏高原全区进行脆弱度评价; 赵志龙等^[10]通过分析青藏高原农牧区旱灾分布情况并结合2010年经济数据对农牧区县域干旱风险展开评估; 张天华等^[11]基于相对风险模型计算得出2015年拉萨河流域的生态风险, 揭示区域主要风险源及风险值的时空分布; Sheng等^[12]通过结合统计数据与实地调研信息等数据对三江源地区草地生态系统进行

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-11-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040301); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZ-KK1003)

作者简介: 聂倩文 (1997-), 女, 河南安阳人, 硕士, 研究方向为水利水电工程。E-mail: nieqianwen97@163.com

通讯作者: 何理 (1976-), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 研究方向为水文水资源管理及地下水修复等。

E-mail: helix111@tju.edu.cn

生态风险评价。

现有的研究大多是以化学污染物^[13] (重金属、多环芳烃等)、单一自然灾害^[14] (洪灾、旱灾、雪灾、泥石流等)、土地利用、景观生态等作为切入点对区域生态风险进行评价, 部分结合人类活动与自然灾害的研究^[15]也大多只考虑社会因素 (如工业废水、建设用地、医疗教育等因素); 在人类活动中单纯选择农牧业相关指标并结合自然因素的研究并不多见。然而近年来青藏高原农牧业发展存在化肥、农药施用过量, 草地超载过牧等问题, 因此以多种自然灾害及农牧业破坏性活动为风险源, 对农牧业开发产生的环境影响展开生态风险研究具有一定的现实意义。

基于此, 本文以青藏高原区域范围内的216个县域单位为研究对象, 基于1990—2015年间历史灾害数据、气象数据和社会经济数据, 以每五年作为一个评估时段, 从生态环境风险源危险度、生态环境脆弱度以及风险受体损失度三个方面对青藏高原各县农牧业开发进行生态风险分析, 绘制青藏高原生态环境风险等级图, 明晰研究时期内风险重心转移规律, 进一步对青藏高原地区进行农牧业风险区划, 以期为本地区农牧业的可持续发展及风险管理提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

青藏高原位于中国西南部, 介于 $73^{\circ}19'\sim 104^{\circ}47'E$ 、 $26^{\circ}00'\sim 39^{\circ}47'N$ 之间, 其东西长约2800 km, 南北最大宽约1000 km, 总面积达 $2.57\times 10^6\text{ km}^2$, 占我国陆地总面积的26.8%^[16]。青藏高原地貌复杂多样, 气候类型空间分异显著。青藏高原是我国乃至世界上最重要的高寒农牧区之一, 作为典型农牧区与生态脆弱区亟需对生态风险时空演变趋势做出把握以辅助地区风险防范决策。

1.2 研究方法 with 数据来源

1.2.1 农牧业生态风险模型构建

根据风险源性质及数量、生境类型与风险影响之间的相互作用, 对生态环境风险评估的初始公式 (1989年Maskrey^[17]提出的风险度=危险度+易损度以及1991年联合国^[18]提出的风险度=危险度 \times 易损度) 进行改进。从危险度—脆弱度—损失度三个方面构建青藏高原农牧业生态环境风险评估模型^[19]:

$$\text{农牧业发展生态风险}(ER) = f\{\text{危险度}[(H)], \text{脆弱度}[(V)], \text{损失度}[(L)]\}$$

该模型从宏观角度对青藏高原农牧业发展的生态环境风险进行评估, 能够综合考虑农牧业发展过程中各种因素对生态环境的影响, 具体计算公式为:

$$ER = \frac{1}{3}(H + V + L) \quad (1)$$

(1) 生态环境风险源危险度

在农牧业发展的驱动因子下, 生态环境受不同风险源干扰, 生境所受胁迫来自于多重风险源。考虑到生态系统在农牧业发展中受到的多重风险压力, 利用相对权重系数来区分各风险源的影响, 采用风险源危险度指数 H 对风险源的发生概率及危险强度进行表征, 公式如下:

$$H = \sum_{i=1}^n \beta_i \times RH_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: RH_i 为第 i 种风险源危险度指数; β_i 表示第 i 种风险源权重; i 为生态风险源种类(个); n 为风险源类型数目(个)。其中 RH_i 计算公式如下:

$$RH_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \times R_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: j 为第 i 种风险源等级; m 为级别总数(个); λ_{ij} 为第 i 种生态风险源第 j 级风险源权重; R_{ij} 为第 i 种生态风险源第 j 级风险源发生的概率。

(2) 生态环境脆弱度

不同生态环境的抗干扰能力及破坏程度不同, 相同强度的风险源作用于多个生态环境可能产生不同程度的危害, 本文从自然、生态、社会等脆弱影响因素出发, 构建生态环境脆弱度评估模型, 对脆弱程度进行定量化表征, 具体计算公式为:

$$V = W_d \times D + W_q \times Q + W_z \times Z + W_s \times S + W_h \times H \quad (4)$$

$$D = \sum_{i=1}^m W_i \times D_i, \quad Q = \sum_{i=1}^m W_i \times Q_i, \quad Z = \sum_{i=1}^m W_i \times Z_i, \quad S = \sum_{i=1}^m W_i \times S_i, \quad H = \sum_{i=1}^m W_i \times H_i \quad (5)$$

式中: V 表示生态环境脆弱度指数; D 、 Q 、 Z 、 S 、 H 分别为地貌、气候、植被、水文和农牧业相关因素的贡献度; D_i 、 Q_i 、 Z_i 、 S_i 、 H_i 分别表示影响生态脆弱性的地貌、气候、植被、水文和农牧业相关因素中第 i 种指标的归一化值; W 为指标权重系数; m 为评估指标的个数(个)。

(3) 生态环境风险受体损失度

生态环境风险受体损失度评估, 即农牧业发展及相关人类破坏活动等发生后对风险受体产生的负面影响。这些影响包括对社会经济的直接扰动和对生态系统结构与功能的损害。受体损失度具体计算公式为:

$$LS = \sum_{i=1}^m W_i \times S_i \quad (6)$$

1.2.2 指标体系与数据来源

本文依据指标体系构建原则, 遴选 35 个指标, 构建青藏高原农牧业开发生态环境风险评估指标体系(表 1), 各指标层权重由层次分析法确定, 归一化方法计算公式如下:

$$\text{正向指标: } I_i = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (7)$$

$$\text{逆向指标: } I_i = \frac{I_{\max} - I}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (8)$$

指标体系计算中使用的自然灾害数据整理自《气象灾害大典》(青海卷、西藏卷、新疆卷、甘肃卷、四川卷、云南卷)、《中国水旱灾害公报》(2001—2019 年)以及各省区水利公报; 人口密度、人均 GDP 和农业总产量等社会经济类数据来源于各省区统计年鉴以及国民经济和社会发展统计公报; 气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn>), 包括高原境内 280 个气象站点的逐日数据; 耕地、草地面积、NDVI 数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供(<http://www.resdc.cn>); DEM 数据由中国科学院计算机网络信息中心提供(<http://www.gscloud.cn>)。

表1 指标体系及权重值
Table 1 Index system and weight value

准则层	类别层	指标层	指标效应	权重
生态环境风险源 危险度 (RH)	自然灾害危险度 (0.600)	雪灾 (发生频率、规模)	正向	0.6000
		旱灾 (发生频率、规模)	正向	0.1000
		洪灾 (发生频率、规模)	正向	0.3000
	人类农牧业破坏性活动危 险度 (0.400)	农药单位使用量	正向	0.1500
		化肥单位使用量	正向	0.2000
		地膜单位使用量	正向	0.1500
		年末牲畜存栏量	正向	0.5000
生态环境脆弱度 (EV)	地貌 (0.076)	坡度	正向	0.5000
		高程	正向	0.5000
	气候 (0.410)	年均气温	负向	0.4536
		年均降雨	负向	0.3404
		年均日照	正向	0.3713
		年均蒸发量	正向	0.0625
		年均风速	正向	0.1064
	植被 (0.139)	植被覆盖指数	负向	0.1390
	水文 (0.052)	水网密度指数	负向	0.0520
	农牧业人类活动干 扰 (0.323)	人均耕地面积	正向	0.0419
		人均草地面积	正向	0.0419
		农业产值比例	正向	0.2037
		牧业产值比例	正向	0.2037
		土地垦殖指数	正向	0.0946
		草地载畜量	正向	0.4141
生态环境风险受 体损失度 (SL)	自然生态系统服务功能损 失度 (0.400)	农作物种植面积占比	正向	0.3034
		草地面积占比	正向	0.4575
		农业机械总动力	正向	0.1016
		有效灌溉面积占比	正向	0.1375
	社会经济损失度 (0.600)	人口密度	正向	0.3185
		人均GDP	正向	0.3185
		农业总产量	正向	0.1291
		牧业总产量	正向	0.1291
		人均粮食产量	正向	0.0524
		人均牲畜头数	正向	0.0524

1.2.3 标准差椭圆及风险重心

标准差椭圆 (Standard Deviation Ellipse, SDE) 可以反映地理要素空间分布的特征, 通过分析空间组织总体轮廓和主导分布方向的变化来探索研究对象的演变规律。本文分别计算 1990—2015 年农牧业生态风险的时序椭圆, 以椭圆中心为青藏高原生态风险重心来识别风险的重心转移规律。利用 ArcGIS 软件方向分布工具以计算所得青藏高原生态风险值为权重计算标准差椭圆, 选择第一级标准差范围 (椭圆包括风险值 68% 的数据)。

1.2.4 生态风险防范分区

为统筹青藏高原地区生态环境保护与农牧业发展，需权衡生态风险控制需求与社会经济发展强度。在县域风险评价的基础上，针对风险等级以及农牧业开发现状等级的高低特征制定区域农牧业发展权衡方案，开展生态风险分区^[20]。以单位风险指数 \overline{ER} 来表征农牧业开发程度， \overline{ER} 越大表明该地区农牧业开发程度越大， \overline{ER} 计算公式如下：

$$\overline{ER}_i = \frac{ER_i}{S_i}$$

(9)

式中： ER_i 为 i 县生态风险值； S_i 为 i 县耕地和草地面积总占比。

根据单位风险指数将处于低、中、高生态风险等级的区域进一步划分三种类型：（1）发展预警区：农牧业发展未饱和，可继续保持当前开发强度，在注意区域生态红线及生态风险防范的前提下开展小规模、低冲击的开发；（2）自然恢复区：该区域为风险防范冷点，保留其开发基础不需要过多的人为干预，重点借助生态系统自身结构功能及抗逆能力实现风险自然调控；（3）限制开发区：农牧业发展相对饱和，需将农牧业生产转变为以绿色发展和生态保护为目标的现代农业发展方向、加强生态修复关注退耕还草等措施。

2 结果分析

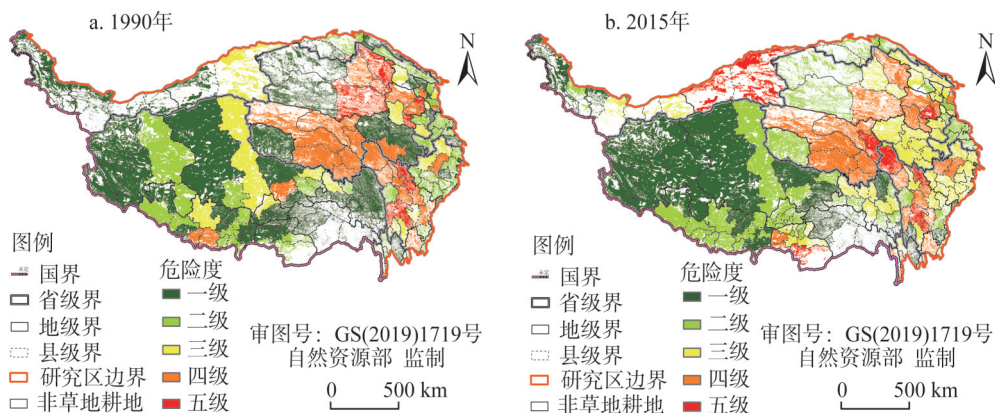
2.1 生态风险时空分布

基于 ArcGIS 空间叠加分别得到生态环境风险源危险度、生态环境脆弱度、风险受体损失度及农牧业生态风险值的评价结果，基于自然断点法进行分级，分级结果如表 2 所示。为保证时序之间具有可比性，各年份分级标准保持一致^[21]。考虑到农牧业生态风险的环境风险受体为耕地与草地，提取该土地利用类型上各指数与风险值，各准则层取研究期初与期末两个年份进行对比分析，风险值进行全时间序列分析。

青藏高原地区 1990 年、2015 年危险度分别为 0.139、0.168，上升 20.86%，危险度总体呈“东部高，西部低”、各年份低值区分布相同的空间分布格局（图 1）。1990 年 V 级危险度主要集中在三江源地区，由于 1986—1990 年间该区域发生 12 起不同程度的雪灾，且其防灾抗灾能力较弱，使得畜牧业发展及人民生活受到较大损害，因此自然灾害危险度较高。此外，自 20 世纪 80 年代起，三江源地区牧区牧民单纯追求畜牧业规模，造成严重的超载过牧现象，导致草场退化、生态环境严重失衡，人类农牧业破坏性活动危险度较高。随着“三江源国家自然保护区”的建立，相较于 1990 年，2015 年三江源地区危险度略有降低。2015 年 V 级危险度主要分布在青藏高原北部的且末县与若羌县，由于强降

表 2 准则层与生态风险分级标准
Table 2 Criterion level and ecological risk classification standards

等级划分	生态环境风险源危险度	生态环境脆弱度	风险受体损失度	生态风险值
I 级	0~0.06	0.22~0.37	0.00~0.07	0.07~0.18
II 级	0.06~0.14	0.37~0.43	0.07~0.12	0.18~0.25
III 级	0.14~0.25	0.43~0.48	0.12~0.16	0.25~0.30
IV 级	0.25~0.41	0.48~0.53	0.16~0.20	0.30~0.37
V 级	0.41~0.61	0.53~0.64	0.20~0.26	0.37~0.48



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 1990年、2015年青藏高原生态环境风险源危险度空间分布

Fig. 1 Spatial pattern of hazards on the Tibetan Plateau in 1990 and 2015

雨偏多导致洪水频发，致使该地区生态环境风险源危险度较高。I、II级危险度主要分布于青藏高原西部地区，该区域平均海拔较高，相对来讲气候不宜居住，因此人类农牧业活动较少，危险度较低。

青藏高原地区1990年、2015年脆弱度分别为0.518、0.478，下降7.70%。由图2可以看出，脆弱度整体下降但分布趋势大体保持一致，高脆弱度地区主要分布在西北部地势较高的羌塘高原以及东北部的柴达木盆地，低脆弱度类型区主要分布在青藏高原东南部地区以及昆仑山北翼。羌塘高原降水较少，年降水量多介于100~300 mm之间，气候干旱加之海拔较高，常年气温偏低，自然景观以荒漠、草甸为主，植被覆盖指数较低(0.1~0.4)，因此该地区属于重度脆弱区。柴达木盆地降水稀少，年降水量多介于50~100 mm之间，植被稀疏，自然景观以荒漠草原为主，植被覆盖指数低(0~0.3)，生态环境整体较差，因此脆弱度较高。青藏高原东南缘海拔相对较低^[22]，自然景观以森林、草地为主，整体植被覆盖指数较高且降水充沛，气温相对较高，生态系统较为稳定，故为轻度脆弱区。昆仑山北翼降水充足，温度较高，自然景观以荒漠绿洲为主，加上人类活

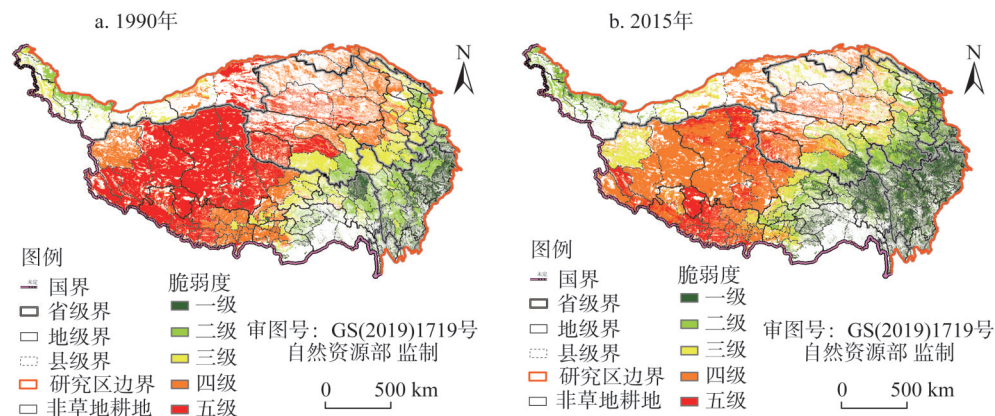


图2 1990年、2015年青藏高原生态环境脆弱度空间分布

Fig. 2 Spatial pattern of vulnerability on the Tibetan Plateau in 1990 and 2015

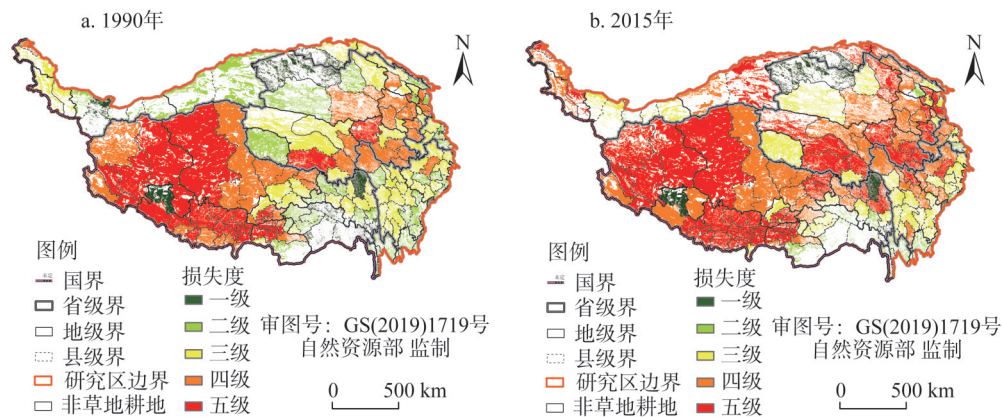


图3 1990年、2015年青藏高原生态环境受体损失度空间分布
Fig. 3 Spatial pattern of receptor loss on the Tibetan Plateau in 1990 and 2015

动干扰较少，整体属于中低脆弱区。

青藏高原地区1990年、2015年受体损失度分别为0.160、0.187，上升16.88%。由图3可以看出1990年受体损失度整体呈现“西高东低”的分布格局，2015年受体损失度普遍增大且高值分布较为分散。随着经济发展和社会进步，青藏高原地区农牧业开发力度加大^[23]，产业活动频繁，提高了社会经济系统发达程度的同时也提高了生态系统的支持功能。当面临风险时，社会经济越发达、生态系统服务功能越完善，风险承受者损失越大即受体损失度越高，因此2015年高受体损失度地区集中在纯牧业区、雅鲁藏布江河谷和湟水河谷地等农业发达地区。其中青藏高原北部若羌、且末等县自2000年来加大农牧业产业结构战略调整，若羌县为建设“中国最优红枣基地”大规模开荒，农业活动增强，其生态环境受体损失度也相应增加。

结合生态环境风险源危险度、脆弱度及受体损失度计算得青藏高原地区1990—2015年农牧业综合生态风险值，其时空分异如表3、图4所示。由每年各等级面积比例可得，研究区综合生态风险以中、低等级为主，整体生态风险值较低。从区域分布上看，高风险区主要集中在雅鲁藏布江谷地、拉萨河谷及三江源地区，总体呈现“东部多核聚集、西部零星散列”的分布格局；中风险区面积较大，多数县域均有较大比例分布；低风险区主要集中在东南及西北边缘地区。青藏高原西部总体处于中、低风险，其中西北部地区地势高峻，地貌反差十分强烈加上冰缘地貌发育，永久冻土和季节性冻土普遍存在，水源利用率也不高，农牧业活动强度较小，因此农牧业生态环境风险值较低；西南

表3 风险值等级面积比例统计

Table 3 Statistics on the proportion of the area of risk value grades						(%)
等级	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年
低风险	1.09	1.15	0.95	0.91	2.74	0.92
中低风险	13.83	11.05	10.23	7.36	14.45	7.08
中风险	50.14	65.46	72.51	69.99	52.66	68.45
中高风险	31.47	21.57	11.24	19.39	26.26	20.20
高风险	3.47	0.76	5.07	2.35	3.89	3.34

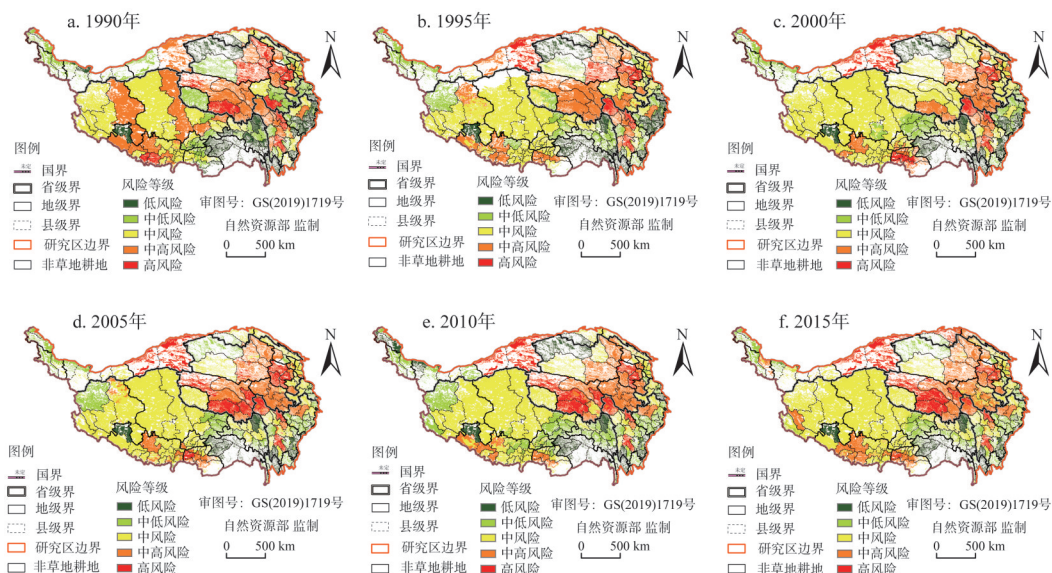


图4 1990—2015年青藏高原生态环境风险值空间分布

Fig. 4 Spatial pattern of ecological risk values on the Tibetan Plateau from 1990 to 2015

部地区生态环境风险处于中等,该区域内尼玛县、班戈县等多为纯牧业县,农业发展受限,加上自然条件相对较差,区域农牧业发展水平低,整体生态环境风险处于中等水平。青藏高原东部相对来讲,高风险区分布较多,其中东北部地区中新疆南部、河湟谷地、三江源地区风险常年较高。新疆南部的若羌县、且末县本身生态环境相对较为脆弱,加上2000年来大力开展红枣产业,开发农业用地导致其风险值逐年增高。河湟谷地地势较低、热量条件好、农业生产条件较好、农业发展较强,加之人口密集,农牧业活动频繁,故其生态风险较高。三江源地区是青藏高原重要的畜牧业生产基地,由于早期农牧业发展没有合理布局,长期超载过牧植被退化导致其生态环境风险值较高。自2005年三江源生态保护和建设工程启动后,该地区采取生态移民、退牧还草等措施,使植被退化趋势得到遏制,生态环境宏观状况好转,生态风险值逐步下降。

2.2 综合生态风险时空分布

2.2.1 生态风险重心的空间跃迁

根据1990年及2015年青藏高原农牧业生态风险值的测算,1990年生态风险重心坐标为(95°19'E, 32°18'N),位于西藏自治区丁青县,2015年生态风险重心坐标为(93°51'E, 33°09'N),位于青海省杂多县,整体来看纬向变化较小,经向变化较为明显,呈现向西北方向移动的趋势。标准差椭圆方位角反映生态风险分布的主趋势方向,2015年较1990年椭圆轴线顺时针偏移17°11',风险演化走向由西—东转变为西北—东南走向;标准差椭圆扁率反映生态风险分布的离散程度,扁率越小空间分布方向性越强,2015年较1990年扁率减小,区域生态风险空间分布更为聚集。由图5可知,1990—2000年间重心向东部偏移变化较小,而2000年后则向西北方向转移,这主要是因为2000年之前研究区域生态风险值整体呈小幅度下降趋势。而自2001年以来,北部地区的若羌县为提高农牧民的收入,抓住国家实施西部大开发的机遇,定下建设中国最优红枣基地的目标,故

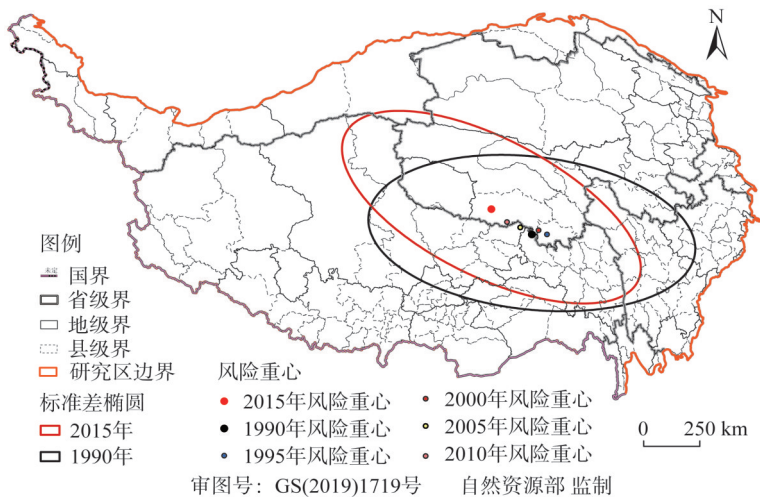


图5 生态风险标准差椭圆及重心变化

Fig. 5 Ecological risk standard deviation ellipse and change in center of gravity

加大耕地开发力度并施行“套种模式”，农业得到迅速发展，却导致生态风险增加；与此同时，青藏高原东部的三江源地区自2000年8月建立“三江源自然保护区”后，当地政府加大治理力度，限制农牧业生产活动，改善区域环境，生态风险逐年降低，故风险中心呈现向西北方向偏移的趋势。

2.2.2 农牧业发展权衡分区及发展方案

为统筹青藏高原农牧业发展与生态环境保护，需厘清农牧业发展强度与生态风险控制需求之间的关系。根据农牧业发展现状与生态环境风险等级的高低组合来确定青藏高原农牧业发展权衡分区，以青藏高原地区2015年农牧业风险为评价对象，根据风险等级与单位风险指数生成的农牧业发展权衡分区如图6所示，统计各区面积占比可知，发展预警区、自然恢复区、限制开发区分别占28.31%、20.75%、50.84%，限制开发区面积占比较大。

从图6来看，发展预警区主要分布在羌塘高原中南部及藏中南部分地区。其中，羌塘高原因其地势高寒、气候干旱多为“无人区”，是野生动物的聚集区和保护区。而中南部地区有一定的人口聚集；中部地区应注意开展生态移民，控制放牧强度^[24]；南部地区人口密度较高，是羌塘高原主要的游牧区，因此应在保证野生动物栖息环境的情况下，鼓励牧民缩短放牧周期，及时出栏，提高牧畜出栏率，增加草地补贴，提高草地产草率。自然恢复区主要分布在三江源地区、一江两河地区及横断山区东部等地区。其中，一江两河、三江源地区均为中、高风险自然恢复区，为青藏高原典型粮食、畜牧业产区，人口密度较高的同时野生资源也十分丰富，因此农牧业发展应注重水源涵养及野生动物保护，在优化种植结构与畜群结构的同时，逐步降低传统农业活动强度，发展有机农牧业等绿色产业以降低生态风险、保护生态安全。限制开发区主要分布在祁连山南坡、青海湖周边地区、柴达木盆地、羌塘高原北部以及横断山区中北部等地区。其中，祁连山南坡及青海湖周边区域为高风险高开发地区，应进一步优化农作物种植结构，限制、管理化肥及农药的使用，严格控制放牧强度，适当退耕、退牧还草以改善生态环境，降低生态环境风险；柴达木盆地为中风险高开发地区，由于生态环境较为脆弱，存

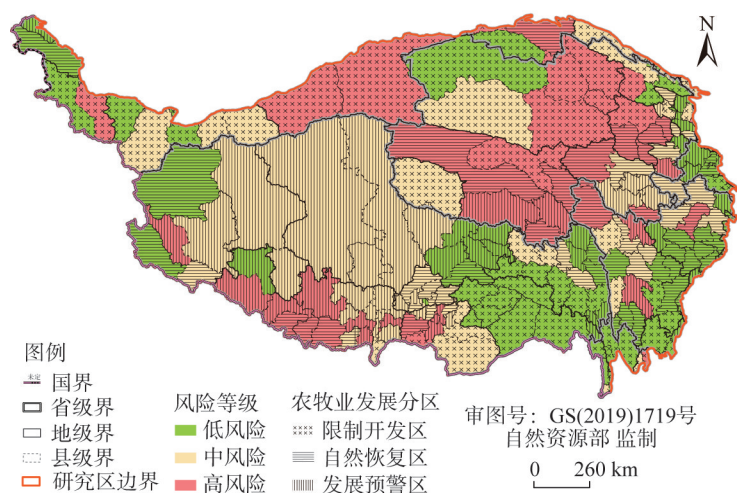


图6 青藏高原农牧业发展权衡分区

Fig. 6 Integrated balance partition for the development of agriculture and animal husbandry on the Tibetan Plateau

在土地荒漠化、沙化及土壤次生盐渍化等现象,因此在农牧业开发进程中应注重保持现有植被以及土地荒漠化的防治,提高绿洲农业区水资源的利用效率;横断山区中北部地区为低风险高开发地区,气候相对较好,农业发展较为发达,但灌溉条件差、农药地膜使用量较高,加上地形限制,可利用土地均已耕垦,农业发展已达饱和,因此应鼓励退耕还草,适当发展牧业调整产业结构,开展高效率、可持续的农牧业发展模式以保证生态环境安全。

3 结论与讨论

3.1 结论

农牧业生态风险评估是实现农牧业发展管理的重要过程,科学的农牧业生态风险评估有助于提升区域风险管理、决策水平,保证区域充分发挥资源禀赋,将农牧业生产转变为以绿色发展和生态保护为目标的现代农牧业发展方向。本文以青藏高原216个县域作为评估对象,构建农牧业生态风险模型,对风险评估结果进行多角度时空分析,形成如下结论:

(1) 生态环境风险源危险度呈现东部高、西部低的空间格局,研究期初与期末危险度分别为0.139、0.168,有明显上升趋势;研究期间生态环境脆弱度分别为0.518、0.478,下降7.7%,生态环境质量趋好、生态系统趋于稳定;风险受体损失度普遍升高,农牧业发展程度较好。

(2) 明确了青藏高原地区生态风险分布格局及风险重心转移规律。牧业生态环境风险呈现“东部多核聚集、西部零星散布”的空间分布格局,研究期间区域整体风险值增加但趋势不明显;风险重心向西北方向移动,风险走向由西—东转变为西北—东南走向。

(3) 确定了青藏高原地区农牧业发展权衡方案并制定相应的发展对策。将全区划分为发展预警区、自然恢复区、限制开发区,分别占研究区面积的28.31%、20.75%、50.84%,青藏高原整体农牧业开发程度较高,应在保障高原生态安全屏障功能的情况下

减缓农牧业开发。

3.2 讨论

本文结合研究区域本底特点与产业结构,从危险度—脆弱度—损失度三个方面构建青藏高原农牧业生态环境风险评估模型,形成多层次、多方面的评估指标体系。该方法既考虑了生态风险产生原因,又能体现农牧业发展现状及当前存在的主要问题,能更客观、科学地评价农牧业生态风险,可以为相关研究提供一定的理论支撑。研究发现的风险时空分布特征及重心转移趋势表明,青藏高原在管控东部农牧业发展、加强生态建设的同时,应特别注意控制西北部农牧业开发的强度和规模。基于农牧业生态风险评价结果生成的风险防范分区,能够为青藏高原地区的生态风险管控提供科学指引。限制开发区应结合当地特点持续推进生态保护和恢复工程,而发展预警区应加大对当地农牧业的扶持力度并充分发挥政府的导向作用,推动农牧业可持续发展与绿色发展。受数据获取所限,本文在灾害统计、地方政策与产业发展等方面数据仍有部分缺失,导致风险评估结果可能存在一定误差。另外,对风险评价指标分级处理存在的不确定性没有进行科学分析与处理,也对评估结果产生一定影响,未来可通过更为精确的不确定性分析方法进一步提高准确性。

参考文献(References):

- [1] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12. [SUN H L, ZHENG D, YAO T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12.]
- [2] 魏慧,吕昌河,刘亚群,等. 青藏高原设施农业分布格局及变化. 资源科学, 2019, 41(6): 1093-1101. [WEI H, LYU C H, LIU Y Q, et al. Spatial distribution and temporal changes of facility agriculture on the Tibetan Plateau. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1093-1101.]
- [3] 徐兰,罗维,周宝同. 基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价:以洋河为例. 自然资源学报, 2015, 30(4): 580-590. [XU L, LUO W, ZHOU B T. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecozone based on land use change: A case study of the Yanghe Watershed, China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 580-590.]
- [4] 路永正,阎伯兴,李宏伟,等. 松花江鱼类中汞含量的演变趋势及其生态风险评价. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2430-2433. [LU Y Z, YAN B X, LI H W, et al. The evolution rule and ecology risk assessment of mercury in fish of Songhua River. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2430-2433.]
- [5] 彭建,吴健生,潘雅婧,等. 基于PSR模型的区域生态持续性评价概念框架. 地理科学进展, 2012, 31(7): 933-940. [PENG J, WU J S, PAN Y J, et al. Evaluation for regional ecological sustainability based on PSR model: Conceptual framework. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 933-940.]
- [6] 赵雪雁,刘春芳,王学良,等. 干旱区内陆河流域农户生计对生态退化的脆弱性评价:以石羊河中下游为例. 生态学报, 2016, 36(13): 4141-4151. [ZHAO X Y, LIU C F, WANG X L, et al. Assessment of the vulnerability of farmers' livelihoods to ecological degradation in arid regions of a continental river basin: A case study of the middle-lower reaches of the Shiyang River in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 4141-4151.]
- [7] KANWAR P, BOWDEN W B, GREENHALGH S. A regional ecological risk assessment of the Kaipara Harbour, New Zealand, using a relative risk model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2015, 21(4): 1123-1146.
- [8] 周伟,钟祥浩,曾云英. 西藏高原农牧区生态风险评估与管理策略:以山南地区扎囊县为例. 干旱地区农业研究, 2006, (3): 164-169, 193. [ZHOU W, ZHONG X H, ZENG Y Y. Ecological risk assessment and management in farming-pastoral area in Tibet Plateau: Case study in Zhanang county Lhoka Prefecture. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, (3): 164-169, 193.]
- [9] 于伯华,吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. 地理研究, 2011, 30(12): 2289-2295. [YU B H, LYU C H. Assess-

- ment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2289-2295.]
- [10] 赵志龙, 张镡锂, 刘峰贵, 等. 青藏高原农牧区干旱灾害风险分析. *山地学报*, 2013, 31(6): 672-684. [ZHAO Z L, ZHANG Y L, LIU F G, et al. Drought disaster risk analysis of Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(6): 672-684.]
- [11] 张天华, 王彤, 黄琼中, 等. 西藏高原拉萨河流域生态风险评估. *生态学报*, 2018, 38(24): 9012-9020. [ZHANG T H, WANG T, HUANG Q Z, et al. Ecological risk assessment of Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 9012-9020.]
- [12] SHENG W P, ZHEN L, XIAO Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of ecological restoration in China's Three Rivers Source Region. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(2): 2307-2313.
- [13] 张艳蓉, 张旭光, 郭梅莹, 等. 典型农牧区土壤重金属污染特征及生态风险评价. *甘肃科技*, 2019, 35(8): 15-20. [ZHANG Y R, ZHANG X G, GUO M Y, et al. Soil heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment in typical agricultural and pastoral areas. *Gansu Science and Technology*, 2019, 35(8): 15-20.]
- [14] 黄晓清, 唐叔乙, 次旺顿珠. 气候变暖背景下西藏高原雪灾变化及其与大气环流的关系. *高原气象*, 2018, 37(2): 325-332. [HUANG X Q, TANG S Y, CIWANG D Z. Variation of the snow disasters under global warming and its relationship with general circulation over Tibetan Plateau. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 325-332.]
- [15] 蒙古军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 983-990. [MENG J J, ZHAO C H. Research progress on index system of regional ecological risk assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 983-990.]
- [16] 张镡锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8. [ZHANG Y L, LI B Y, ZHENG D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8.]
- [17] MASKREY. *A Disaster Mitigation: A Community Based Approach*. Oxford: Oxfam, 1989.
- [18] United Nations Department of Humanitarian Affairs (UNDHA). *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: A Manual for Policy Makers and Planners*. New York: United Nations, 1991.
- [19] 许妍, 马明辉, 高俊峰. 流域生态风险评估方法研究: 以太湖流域为例. *中国环境科学*, 2012, 32(9): 1693-1701. [XU Y, MA M H, GAO J F. The evaluation method of ecological risk assessment based on watershed scale: Take the Taihu Watershed as example. *China Environmental Science*, 2012, 32(9): 1693-1701.]
- [20] 彭建, 谢盼, 刘焱序, 等. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡: 以大理白族自治州为例. *地理学报*, 2015, 70(11): 1747-1761. [PENG J, XIE P, LIU Y X, et al. Integrated ecological risk assessment and spatial development trade-offs in low-slope hilly land: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture, China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1747-1761.]
- [21] 刘迪, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区生态风险时空动态及其风险分区: 以陕西省米脂县为例. *自然资源学报*, 2019, 34(9): 2012-2025. [LIU D, CHEN H, SHI Q Q, et al. Spatio-temporal variation of ecological risk in the loess hilly-gully region and its precaution partitions: A case study of Mizhi county, Shaanxi province, China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 2012-2025.]
- [22] 曹建军, 许雪赞, 杨书荣, 等. 青藏高原不同草地利用方式产生的原因及其对社会—生态系统的影响研究进展. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2149-2159. [CAO J J, XU X Y, YANG S R, et al. Advance in the reasons for two different grassland use patterns formed and their each effects on the socio-ecological system on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2149-2159.]
- [23] 段健, 徐勇, 孙晓一. 青藏高原粮食生产、消费及安全风险格局变化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 673-688. [DUAN J, XU Y, SUN X Y. Spatial patterns and their changes of grain production, grain consumption and grain security in the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 673-688.]
- [24] 徐增让, 靳茗茗, 郑鑫, 等. 羌塘高原人与野生动物冲突的成因. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1521-1530. [XU Z R, JIN M M, ZHENG X, et al. Causes for human-wildlife conflict on Changtang Plateau in Tibet. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1521-1530.]

Spatio-temporal variation of ecological risk of agriculture and animal husbandry on the Tibetan Plateau and its regional prevention and control

NIE Qian-wen^{1,2}, HE Li^{1,3}, YIN Chuang¹, TANG Meng¹, TIAN Pei-pei^{1,2}, LU Hong-wei²

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102200, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300000, China)

Abstract: The Tibetan Plateau is an important ecological security shelter and strategic resource reserve base. Its ecological security is of great significance to China. Ecological and environmental risks of agriculture and animal husbandry production are core issues for sustainable development of the plateau. This paper established an ecological risk assessment system for agriculture and animal husbandry to analyze the ecological risks of agriculture and animal husbandry of the study area from 1990 to 2015. The spatio-temporal pattern of the ecological risks was explored. Then, the agriculture and animal husbandry ecological risk trade-off zones were identified in combination with the regional agriculture and animal husbandry development intensity. Results showed that: (1) The ecological risk presented an upward trend, showing a distribution pattern of "multi-core aggregation in the east and scattered hashing in the west". (2) The risk gravity shifted to the northwest. (3) The restricted development zone of the plateau accounts for the largest proportion of 50.84%, followed by restricted development zones and natural restoration zones. The overall agriculture and animal husbandry development intensity was relatively high. Thereby, the development of agriculture and animal husbandry should be slowed down to ensure the function of the ecological security barrier on the plateau. The results were expected to provide scientific guidance for ecological prevention and development planning of agriculture and animal husbandry on the Tibetan Plateau.

Keywords: ecological risk analysis; spatio-temporal distribution; shifting of risk gravity; agriculture and animal husbandry risk precaution partitions; Tibetan Plateau