doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.024

西藏“一江两河”耕地生态安全时空格局与障碍诊断

李　丹[1]　田沛佩[2]　罗红英[3]　罗玉峰[1]　崔远来[1]

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
2. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206; 3. 西藏农牧学院水利与土木工程学院, 林芝 860000)

摘要: 基于青藏高原农业活动对耕地生态系统的影响,针对青藏高原耕地生态安全面临的问题,从压力-状态-响应(Press-state-response,PSR)概念模型出发,提出由 3 类要素、13 种指标所组成的耕地生态安全评价指标体系,构建西藏“一江两河”地区耕地生态安全评价模型,分析 1985—2013 年期间耕地生态安全的时空演变格局,探讨不同区域耕地生态安全的障碍因素。结果表明,西藏“一江两河”地区农业活动强度较大,尤其 2000 年以来,化肥、农药的成倍施用给生态安全带来巨大的隐患。20 世纪,各县耕地生态安全基本处于“优秀”水平;2000—2010 年,各县耕地生态安全等级下降,逐步向“差”转化;2010 年以后,耕地生态安全有所改善,逐渐恢复为“优秀”或“良好”。整体来看,“一江两河”地区耕地生态安全水平较为一致,仅个别县域生态安全水平较为落后。区域耕地生态安全障碍因子具有相似性和差异性双重特征,单位面积氮肥、磷肥施用量是限制耕地生态安全的主要障碍因素。本研究揭示了高原地区耕地生态安全的演变过程,可为制定差别化的生态安全调控策略提供依据。

关键词: 耕地生态安全; 时空格局; 障碍因子; 农业活动; “一江两河”地区

中图分类号: F301.22; X171.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0213-10　　**OSID**:

Spatio-temporal Characteristics and Obstacle Diagnosis of Cultivated Land Ecological Security in “One River and Two Tributaries” Region in Tibet

LI Dan[1]　TIAN Peipei[2]　LUO Hongying[3]　LUO Yufeng[1]　CUI Yuanlai[1]

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*
2. *School of Renewable Energy*, *North China Electric Power University*, *Beijing* 102206, *China*
3. *School of Civil and Hydraulic Engineering*, *Xizang Agriculture and Animal Husbandry College*, *Linzhi* 860000, *China*)

Abstract: In view of the challenges faced by the ecological security of cultivated land on the Qinghai-Tibet Plateau, an evaluation model for the ecological security of cultivated land in “one river and two tributaries” in Tibet was established to clarify the impact of agricultural development on the ecological security of cultivated land. The ecological security of cultivated land index system was proposed based on pressure-state-response (PSR) model, consisting of three elements and 13 indicators. The spatial and temporal change pattern of cultivated land ecological security from 1985 to 2013 was analyzed, and the obstacle factors of cultivated land ecological security in different regions were probed. Results showed that the intensity of agricultural development in the “one river and two tributaries” region of Tibet was relatively high, especially since 2000, when the application of chemical fertilizers and pesticides brought huge hidden dangers to ecological security. Before the 21th century, cultivated land ecological security in all counties was basically at the “excellent” level. From 2000 to 2010, the level of cultivated land ecological security in all counties was decreased and gradually changed to “poor”. Then, cultivated land ecological security was improved after 2010 and gradually recovered to “excellent” or “good”. The grade of cultivated land ecological security in the “one river and two tributaries” areas as a whole was relatively consistent, but the level of ecological security in a few counties was relatively backward. The obstacle

收稿日期: 2020-02-09　修回日期: 2020-03-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)(XDA2004030102)、国家自然科学基金项目(91647204)和西藏农牧学院柔性引进人才项目

作者简介: 李丹(1995—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: lidann@whu.edu.cn

通信作者: 罗玉峰(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术及智慧灌溉平台研究,E-mail: yfluo@whu.edu.cn

factors of regional cultivated land ecological security both had a certain regional similarity and an obvious spatial heterogeneity. The application of nitrogen and phosphorus fertilizer was the main obstacle to the ecological security of cultivated land. The research result can reveal the historical and realistic state of the evolution of cultivated land ecological security in the plateau region and provide a basis for formulating differentiated ecological security regulation strategies.

Key words: cultivated land ecological security; spatial and temporal patterns; obstacle factor; agriculture activity; "one river and two tributaries" region

0 引言

受高寒自然地理环境、恶劣的农业资源开发利用条件的影响,西藏耕地资源相对稀少,主要分布在海拔低、水热条件优越以及土壤较为肥沃的河谷地区[1-2]。"一江两河"地区是西藏重要的粮食生产基地和生态屏障保护区。国家"八五"计划将"一江两河"中部流域的综合开发规划为重点建设项目,要求以农业开发为主体,从 1991 年起用 10 年左右时间,通过兴修水利、改造中低产田等为农业生产提供稳固、坚实的基础和良好的生态屏障。高原地区的现代农业发展水平较低,具有典型的传统农业演变特征[3]。传统农业的粗放经营致使耕地土壤沙化、肥力下降,水土流失加剧[4-5],自然界的环境压力使生态环境极为脆弱,高原地区耕地生态安全面临人类与自然的双重压力[6-7]。高原独特的自然条件及生态环境的脆弱特征在客观上决定了生态安全深受农业资源开发利用的影响,未来农业发展将面临诸多生态安全问题。

耕地生态安全是指一定时间和范围内耕地生态系统能够保持自身结构和功能稳定、不受干扰的状态,其概念来自国内外对"生态安全"的研究,即生态环境资源状况不受或少受来自资源和生态环境的制约与威胁的状态[8-9]。生态安全已成为国内外学者广泛关注的领域,包括土地生态安全评价[10-12]、生态风险评价[13-15]以及评价模型[16-18]等。其评价对象多集中在省域、市域尺度范围内或典型的生态保护区。指标体系构建多来源于社会、经济以及环境 3 方面,并基于压力-状态-响应(PSR)模型、生态足迹模型等对指标体系进行划分,进而对生态安全进行评价。尽管大量研究已开展定量分析,但评价年限较短,评价结果往往是静态的,难以揭示生态安全的动态演化规律。且鲜见开展生态安全的时空特征分析,从时间和空间角度分别讨论生态安全的相似性与异质性,并分析影响区域生态安全障碍因素的相关研究。鉴于此,本文构建耕地生态安全评价模型,从时空角度探究西藏"一江两河"地区 1985—2013 年期间农业开发对耕地生态安全的影响,并利用障碍因子诊断模型寻找影响耕地生态安全的指标,以期为制定差别化的生态安全调控策略提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西藏"一江两河"地区位于青藏高原西南部(89°00′~92°35′E,28°20′~31°20′N),尤指雅鲁藏布江中游及其支流年楚河和拉萨河的河谷地区。该地区东起山南市桑日县,西达日喀则市拉孜县,北抵冈底斯山-念青唐古拉山脉,南接藏南河谷区,包括拉萨市、山南地区以及日喀则地区在内的 18 个县域及市区(图 1)。"一江两河"地区是西藏自治区土地利用程度最高的区域,土地面积 6.57×10^4 km^2,占西藏自治区土地面积的 5.52%,其中耕地面积占西藏自治区耕地总面积的 60% 以上,人口占西藏自治区总人口的 36%。该地区海拔位于 2 700~4 200 m 之间,属典型高原温带季风半干旱气候,气候温和,雨热同期,年均气温 4.7~8.3℃,年降水量 251.7~580.0 mm,降水主要集中在 5—9 月,形成极为明显的干、湿两季。

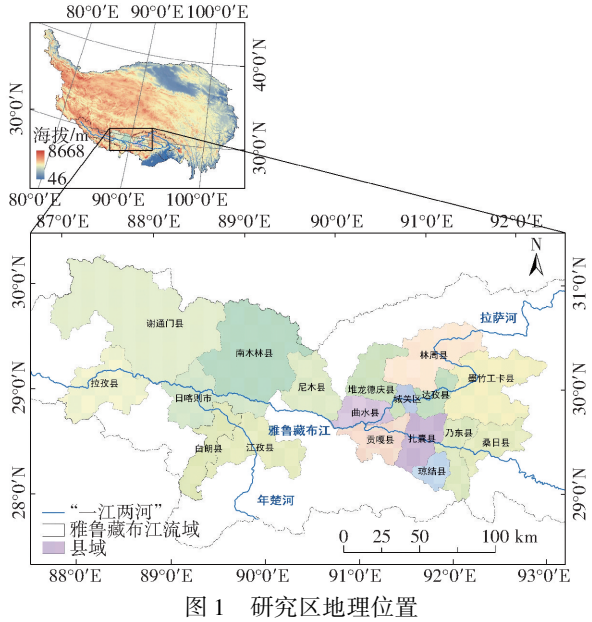

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源

采用的数据主要源于西藏统计年鉴(1989—2014 年)[19]、拉萨市统计年鉴(2006—2014 年)[20]、

日喀则市统计年鉴(2008、2010 年)[21]以及西藏自治区政府部门公开信息及年度报告,还有部分数据根据土地利用数据和统计数据计算合成。

2　研究方法

2.1　耕地生态安全的 PSR 指标体系构建

PSR 模型是联合国经济合作和开发组织与联合国规划署共同组织发起的一项反映可持续发展机理的理论框架[22-23]。该模型以因果关系为基础,强调压力-状态-响应的逻辑思维过程,人类活动消耗资源,对自然系统造成威胁,形成了“压力”,在这段时期内自然界所表现出来的生态状况,称为“状态”,“响应”则是社会通过人类意识和活动制定环境、经济、土地政策或措施进而减缓人类活动对环境的压力的行为。“压力”是“状态”发生的原因,也是“响应”的结果。在对耕地生态安全评价的过程中,该模型同时考虑了一定时期内农业活动对耕地生态安全的破坏程度和保护行为,能够较科学、全面地评估地区的耕地生态安全状况。因此,本研究从 PSR 模型出发,综合考量“一江两河”地区生态安全的自然环境特征和潜在的人类干扰因素,按照科学性、核心性、可操作性以及动态性原则,借鉴国内相关研究成果,重点选取 13 项农业活动相关指标,构建研究区域耕地生态安全评价指标体系(表 1)。

表 1　耕地生态安全评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of cultivated land ecological security

目标层	准则层	指标层	指标说明	效应
耕地生态安全	压力	人均耕地面积(C1)/(hm^2·人$^{-1}$)	耕地总面积与总人口比值	+
		单位面积农业机械总动力(C2)/(kW·hm^{-2})	农业机械总动力与耕地面积比值	+
		单位面积氮肥施用量(C3)/(kg·hm^{-2})	氮肥施用量与耕地面积比值	−
		单位面积磷肥施用量(C4)/(kg·hm^{-2})	磷肥施用量与耕地面积比值	−
		单位面积钾肥施用量(C5)/(kg·hm^{-2})	钾肥施用量与耕地面积比值	−
		单位面积农药施用量(C6)/(kg·hm^{-2})	农药总施用量与耕地面积比值	−
		单位面积塑料薄膜使用量(C7)/(kg·hm^{-2})	塑料薄膜使用量与耕地面积比值	−
	状态	农村居民人均纯收入(C8)/(元·人$^{-1}$)	农村居民纯收入与农村人口比值	+
		单位面积粮食产量(C9)/(kg·hm^{-2})	粮食总产量与耕地面积比值	+
		归一化植被指数(C10)	耕地范围内归一化植被指数的平均值	+
		水功能区水质达标率(C11)/%	为保障水体使用功能而划定的区域中,水质指标达标的水体占总水体的百分比	+
	响应	有效灌溉面积比重(C12)/%	有效灌溉面积占耕地面积百分比	+
		旱涝保收面积比重(C13)/%	旱涝保收面积占耕地面积百分比	+

2.2　耕地生态安全评价方法

2.2.1　指标权重确定

为避免人为主观因素的误差[24],采用熵权法确定各指标权重,假设评价对象有 n 个评价系统,m 个评价指标,n 代表时间特征中的评价年份或空间特征中的评价对象。事实上,在分析 18 个县耕地生态安全演变的时间规律时,各县之间是独立的个体,对比标准为每个县自身的生态安全状况,权重根据指标的长时间序列确定。而在分析耕地生态安全的空间特征时,比较标准为“一江两河”地区整体水平,探究是否存在某个县的耕地生态安全水平落后,此时权重由典型年下 18 个县的统计数据确定。评价体系原始数据矩阵可表示为 $\boldsymbol{X}=\{x_{ji}\}_{n\times m}(j=1,2,\cdots,n;\ i=1,2,\cdots,m)$,$x_{ji}$表示第 j 个系统第 i 个指标值。具体步骤如下:由于熵值法运用了对数和熵的概念,需要对初始数据进行标准化处理,按照评价指标性质,分别采用正向和负向极值法对指标进行标准化处理,构成标准化指标矩阵 $\boldsymbol{Y}=\{y_{ji}\}_{n\times m}(j=1,2,\cdots,n;\ i=1,2,\cdots,m)$,$y_{ji}$表示第 j 个系统第 i 个标准化指标值,之后计算各指标的信息熵 E_i,即

$$E_i=-\ln n^{-1}\sum_{j=1}^{n}p_{ji}\ln p_{ji} \tag{1}$$

其中

$$p_{ji}=\frac{y_{ji}}{\sum_{j=1}^{n}y_{ji}}$$

确定各指标的权重 w_i 为

$$w_i=\frac{1-E_i}{m-\sum_{i=1}^{m}E_i} \tag{2}$$

2.2.2　评价指标关联度确定

物元可拓法是可拓性的定性分析与关联函数的定量计算相结合的研究方法,用于解决不相容的复杂问题,适合于多因子的综合评价[25-26]。耕地生态安全评价具有动态性和模糊性,涉及的指标较多,单项指标评价结果具有不相容性,同时生态安全的优劣没有明确界限,因此可利用物元分析法构建生态安全评价模型,计算步骤为:

(1)确定耕地生态安全物元

物元分析中所描述的对象 N 及其特征向量 $\boldsymbol{C}$ 和特征量值 $\boldsymbol{V}$ 共同构成耕地生态安全物元 $\boldsymbol{R}=(N,\boldsymbol{C},\boldsymbol{V})$。假设“一江两河”耕地生态安全对象 N 有多个特征,则它以 m 个特征 $c_1,c_2,\cdots,c_m$ 和相应的量值 $v_1,v_2,\cdots,v_m$ 描述。表示为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \tag{3}$$

(2)确定经典域和节域

经典域物元矩阵可表示为

$$\boldsymbol{R}_{oh}=(N_{oh},\boldsymbol{C},\boldsymbol{v}_{oh})=\begin{bmatrix} N_{oh} & c_1 & v_{oh1} \\ & c_2 & v_{oh2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_{ohm} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_{oh} & c_1 & \langle a_{oh1},b_{oh1}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{oh2},b_{oh2}\rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & \langle a_{ohm},b_{ohm}\rangle \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{R}_{oh}$——构建的经典域物元

N_{oh}——耕地生态安全的第 h 个评价等级($h=1,2,\cdots,k$)

$\langle a_{ohi},b_{ohi}\rangle$——经典域物元对应第 i 个特征向量第 h 个评价等级的量值区间范围

耕地生态安全的节域物元矩阵表示为

$$\boldsymbol{R}_p=(N_p,\boldsymbol{C},\boldsymbol{v}_p)=\begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1},b_{p1}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2},b_{p2}\rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & \langle a_{pm},b_{pm}\rangle \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{R}_p$——节域物元

$\langle a_{pi},b_{pi}\rangle$——节域物元对应特征向量的量值区间范围,$\langle a_{pi},b_{pi}\rangle$ 属于 $\langle a_{ohi},b_{ohi}\rangle$

N_p——耕地生态安全评价全部的等级

(3)确定关联函数及关联度

任意一点 y_i(特征向量 $\boldsymbol{c}_i$ 的量值)到经典域区间 Y_{ohi}、节域区间 Y_{pi} 的距离分别为

$$\begin{aligned} \rho(y_i,Y_{ohi})&=\left|y_i-\frac{1}{2}(a_{ohi}+b_{ohi})\right|-\frac{1}{2}(b_{ohi}-a_{ohi}) \\ \rho(y_i,Y_{pi})&=\left|y_i-\frac{1}{2}(a_{pi}+b_{pi})\right|-\frac{1}{2}(b_{pi}-a_{pi}) \end{aligned} \tag{6}$$

则耕地生态安全评价第 i 个指标相应于第 h 个评价等级的关联函数 $K_h(y_i)$ 定义为

$$K_h(y_i)=\begin{cases} \dfrac{-\rho(y_i,Y_{ohi})}{|Y_{ohi}|} & (y_i\in Y_o) \\ \dfrac{\rho(y_i,Y_{ohi})}{\rho(y_i,Y_{pi})-\rho(y_i,Y_{ohi})} & (y_i\notin Y_o) \end{cases} \tag{7}$$

式中 y_i——耕地生态安全物元的量值

Y_{ohi}——经典域物元的第 i 个评价指标第 h 个评价等级所对应的量值范围

Y_{pi}——节域物元第 i 个指标的量值范围

若 $K_{h\max}(y_i)=\max K_h(y_i)(h=1,2,\cdots,k)$,则评价对象 N 关于指标 i 的评价等级为 h 级。

(4)确定耕地生态安全等级的综合关联度

生态安全评价对象 N 关于第 h 评价等级的综合关联度为

$$K_h=\sum_{i=1}^{m}w_iK_h(y_i) \tag{8}$$

若 $K_{h\max}=\max K_h(h=1,2,\cdots,k)$,则评价对象 N 的耕地生态安全评价等级即为 h 级。

关联函数表示待评对象隶属于耕地生态安全水平某一等级的程度,$K_h(y_i)$ 越大,表示该指标或者评价对象在该等级中稳定性越强。相反若 $K_h(y_i)$ 越小,则说明该指标或者评价对象向其他等级转化的趋势越强。

2.3 耕地生态安全障碍因子诊断模型

识别并分析不同区域影响耕地生态安全的障碍因子,是制定针对性生态安全调控策略的重要依据。引入因子贡献度、指标偏离度以及指标障碍度 3 个基本变量,对耕地生态安全障碍因子作进一步诊断,计算公式为

$$O_{ji}=\frac{F_{ji}I_{ji}}{\sum_{i=1}^{m}(F_{ji}I_{ji})}\times 100\% \tag{9}$$

式中 O_{ji}——第 j 个系统第 i 项指标的障碍度,即单项要素对耕地生态安全的影响值,其数值可以确定影响耕地生态安全的主要因素及影响程度

F_{ji}——第 j 个系统第 i 项指标偏离度,指单项指标评估值与最优目标值的差距,可以用 1 与标准化指标值 y_{ji} 的差表示

I_{ji}——第 j 个系统第 i 项指标的贡献度,可直接用各项指标权重 w_i 表示

3 结果与分析

3.1 农业开发强度动态变化

耕地面积、化肥施用量、农药施用量以及粮食产量是反映农业开发程度最为直接的指标,为了解“一江两河”地区农业发展历程,分析了拉萨市、山南地区以及日喀则地区这 4 个指标的动态变化(图 2)。拉萨市耕地面积总体呈现阶梯式下降但幅度不大,日喀则地区耕地面积呈现明显的阶梯式上升,山南地区耕地面积基本无变化。拉萨市、山南地

区以及日喀则地区的化肥、农药施用量均明显增加。拉萨市 2009 年左右化肥施用量出现增长拐点，仅 5 年时间化肥施用量增长近一倍。日喀则地区的化肥施用量呈现持续的翻倍增长，在耕地面积只增加 15% 的情况下，化肥施用量增加了 300%。山南地区是“一江两河”地区化肥施用量增长最缓慢的地区。

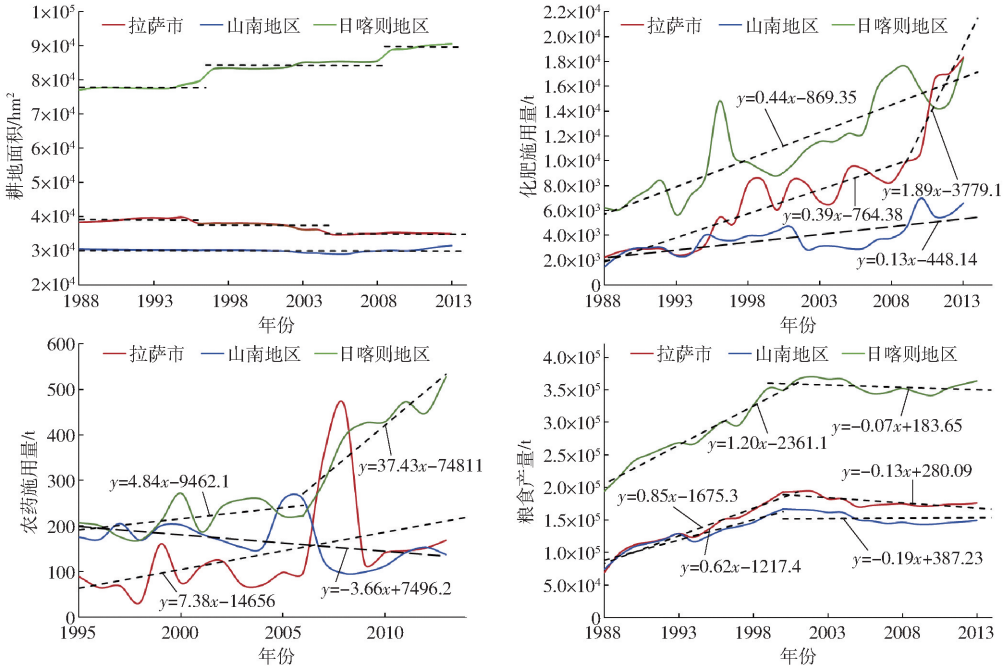

图 2　“一江两河”地区耕地面积、化肥、农药以及粮食产量动态变化曲线

Fig. 2　Dynamic changes of cultivated land area, chemical fertilizer, pesticide and grain yield in “one river and two tributaries” area

“一江两河”地区农药施用量波动较大。由于个别年份数据缺失，只展示 1995 年以来农药施用量的变化情况。日喀则地区的农药施用量在 2006 年左右发生突变，农药用量增长速率约为 37.43 t/a。与化肥施用量相比，拉萨市的农药施用量总体上增长较为缓慢，但波动较大。山南地区农药施用量呈现明显的下降趋势。“一江两河”地区粮食产量变化趋势较为一致，总体上分为两个阶段，分别为 1988—2000 年稳定上升阶段以及 2000—2014 年平稳阶段。可见 1990—2000 年这 10 年是“一江两河”地区农业发展的黄金时期，粮食产量翻倍增加，参考化肥、农药施用量的变化趋势，可初步认为该时期化肥、农药的增加主要产生正效应，有助于粮食增产。但在 2000 年以后，粮食产量趋于平稳，但化肥、农药施用量反而呈现增加趋势。在此阶段，化肥、农药的过量施用给生态安全带来巨大的隐患。尽管青藏高原用于农业生产的土地范围较小，但由于其生态环境的脆弱性与特殊的生态地位，其对生态安全的危害不容忽视。

3.2　耕地生态安全演化的时空格局

3.2.1　耕地生态安全评价指标分级标准

由于耕地生态安全评价具有可拓性，将耕地生态安全的程度描述为 5 个等级：优秀、良好、中等、较差、差。本研究确定的耕地生态安全评价的经典域完全依据国家各行业规范及标准、地区发展规划纲要、公报以及国内学者对相关内容的研究成果，确保每个指标经典域的确定有理可依、有据可循，因地制宜、综合考量各指标的分级标准，保证各经典域的代表性。此外，为保证分级标准的合理性，同时参考了 2014、2015 年度西藏自治区生态县名单，以这两年生态县的各项指标值衡量分级标准的可靠性，建立的耕地生态安全评价的物元经典域、节域范围如表 2 所示。

人均耕地面积（C1）指标的分级标准参考联合国粮农组织 0.053 hm^2 警戒线的标准，以及全国人均耕地面积平均水平 0.091 hm^2，并结合摆万奇等[27]以及王西琴等[28]对人均耕地面积的等级划分。单位面积农业机械总动力（C2）指标经典域依据蒋和平等[29]划分的标准值范围、“国家现代农业示范区建设规划（2015—2020 年）”中农业机械化标准以及国内农机装备较高水平。单位面积氮肥、磷肥、钾肥施用量（C3 ~ C5）经典域的确定参考刘钦普[30]及王激清等[31]相关结论。单位面积农药施用量（C6）指标的分级标准参考《西藏自治区“十三五”时期国民经济和社会发展规划纲要》、《生态县、生态市、生态省建设指标》以及《水生态文明城市建设评价导则》。单位面积塑料薄膜使用量（C7）指标的分级标准主要参考 2014 年度及 2015 年度生态县林芝县、

表 2 耕地生态安全评价指标经典域、节域范围

Tab. 2 Classical domain scale and section domain scale of cultivated land ecological security evaluation index

指标	经典域					节域
	优秀	良好	中等	较差	差	
C1/(hm²·人⁻¹)	0.233 ~ 0.240	0.162 ~ 0.233	0.091 ~ 0.162	0.053 ~ 0.091	0 ~ 0.053	0 ~ 0.24
C2/(kW·hm⁻²)	50 ~ 100	30 ~ 50	20 ~ 30	10 ~ 20	0 ~ 10	0 ~ 100
C3/(kg·hm⁻²)	0 ~ 150	150 ~ 175	175 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	0 ~ 300
C4/(kg·hm⁻²)	0 ~ 75	75 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	0 ~ 300
C5/(kg·hm⁻²)	0 ~ 75	75 ~ 150	150 ~ 225	225 ~ 300	300 ~ 350	0 ~ 350
C6/(kg·hm⁻²)	0 ~ 3.0	3.0 ~ 3.5	3.5 ~ 4.0	4.0 ~ 4.5	4.5 ~ 6.0	0 ~ 6
C7/(kg·hm⁻²)	0 ~ 6	6 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 40	40 ~ 55	0 ~ 55
C8/(元·人⁻¹)	8 000 ~ 13 000	6 000 ~ 8 000	3 500 ~ 6 000	1 500 ~ 3 500	0 ~ 1 500	0 ~ 13 000
C9/(kg·hm⁻²)	4 000 ~ 6 000	2 250 ~ 4 000	1 875 ~ 2 250	1 500 ~ 1 875	0 ~ 1 500	0 ~ 6 000
C10	0.5 ~ 0.6	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4	0.1 ~ 0.3	0 ~ 0.1	0 ~ 0.6
C11/%	90 ~ 100	75 ~ 90	60 ~ 75	40 ~ 60	0 ~ 40	0 ~ 100
C12/%	90 ~ 100	80 ~ 90	70 ~ 80	60 ~ 70	0 ~ 60	0 ~ 100
C13/%	80 ~ 100	60 ~ 80	36 ~ 60	18 ~ 36	0 ~ 18	0 ~ 100

工布江达县、米林县以及朗县的农用塑料薄膜使用量以及全自治区薄膜使用量情况。农村居民人均纯收入(C8)指标经典域的确定参考《生态县、生态市、生态省建设指标》以及陆华东[32]指出的西藏自治区新世纪扶贫指标标准,为消除通货膨胀对人均收入的影响,各年份的收入均通过通货膨胀率换算而得。单位面积粮食产量(C9)指标经典域的确定依据《西藏自治区“十三五”时期国民经济和社会发展规划纲要》以及刘景辉等[33]指出的全国县级农业综合开发后备土地资源调查中对高、中、低产田的标准。归一化植被指数(C10)指标的分级标准参考研究中常用的 NDVI 划分[34]。水功能区水质达标率(C11)指标根据《生态县、生态市、生态省建设指标》中相应标准划分。有效灌溉面积比重(C12)指标根据《西藏自治区“十三五”时期国民经济和社会发展规划纲要》以及蒋和平等[29]提出的范围确定。旱涝保收面积比重(C13)指标根据《西藏自治区“十三五”时期国民经济和社会发展规划纲要》以及中国国情领导决策数据分析中心的全国旱涝保收耕地比重仅为 34.5% 确定。

3.2.2 耕地生态安全时间特征

以“一江两河”地区各县为单位,分别探究每个县从 1985—2013 年耕地生态安全的变化。由于篇幅有限,不一一列举 18 个县的计算结果,仅以 2013 年拉萨市墨竹工卡县为例叙述耕地生态安全评价过程。根据 2013 年墨竹工卡县耕地生态安全指标体系的量值,得到每个指标关于每个等级的关联度(表 3),并根据求得的关联度判定各年份每个指标所处的评价等级。以墨竹工卡县人均耕地面积(C1)为例,计算求得 C1 的 $K_1 \sim K_5$ 分别为 -0.015、-0.002、0.004、-0.019、-0.028,其中 K_3 取值最大,可判定 2013 年 C1 处于Ⅲ等级,即中等水平。同理可以判定出其他指标所处的水平。结合耕地生态安全评价指标权重和相应的耕地生态安全指标关联度得到耕地生态安全评价指标综合关联度,进而可判定耕地生态安全评价指标的压力关联度、状态关联度、响应关联度以及综合关联度所处的等级(表 3)。由表 3 可以看出,2013 年拉萨市墨竹工卡县压力水平处于Ⅳ较差等级,状态水平处于Ⅰ优秀等级,响应水平处于Ⅳ较差等级,最终耕地生态安全评价处于Ⅳ较差等级。结果表明,耕地面积、农业机械、化肥、农药和塑料薄膜的使用对耕地生态安全带来了较大的负荷,而同时人类社会对生态环境保护的能力还不够,但是由于生态环境本身具有一定的承载力,粮食产量、植被以及水质尚处于优秀水平,但从整体来看,综合 3 方面的影响,耕地生态安全的水平仍旧处于较差水平,耕地生态环境承载的负荷大,人类的监管力度也应有进一步的提高。

图 3 为 18 个县域耕地生态安全演变的时间特征。城关区耕地生态安全变化波动性较大,2006—2007 年生态安全等级为“差”,2008—2013 年期间生态安全水平有提高的迹象。林周县、尼木县、达孜县以及墨竹工卡县 1985—2010 年生态安全等级基本为“优秀”或“良好”,进入 2010 年后耕地生态安全出现恶化,尤其墨竹工卡县耕地生态安全等级为“差”。堆龙德庆县在 20 世纪 90 年代就出现了生态安全“差”的情况,且在 2010—2013 年表现出生态安全逐渐恶化的趋势,安全等级由“优秀”向“中等”、“较差”演变。类似地,曲水县在 2010—2013 年连续 4 年生态安全等级为“中等”水平。除日喀则市区以外,日喀则地区耕地生态安全等级基本为

表 3　2013 年墨竹工卡县耕地生态安全评价指标关联度

Tab. 3　Degree of association for evaluation index of cultivated land ecological security in Maizhokunggar County

评价指标	2013 年关联度					判定等级
	优秀(Ⅰ)	良好(Ⅱ)	中等(Ⅲ)	较差(Ⅳ)	差(Ⅴ)	
C1	-0.015	-0.002	0.004	-0.019	-0.028	Ⅲ
C2	-0.063	-0.052	-0.036	0.034	-0.014	Ⅳ
C3	-0.017	0.014	-0.003	-0.021	-0.044	Ⅱ
C4	-0.070	-0.057	-0.038	0.021	-0.014	Ⅳ
C5	-0.046	-0.031	0.004	-0.002	-0.033	Ⅲ
C6	-0.032	-0.024	-0.013	0.016	-0.005	Ⅳ
C7	0.004	-0.036	-0.035	-0.039	-0.040	Ⅰ
C8	0.019	-0.019	-0.036	-0.047	-0.052	Ⅰ
C9	0.017	-0.017	-0.037	-0.039	-0.041	Ⅰ
C10	-0.029	0.044	-0.060	-0.094	-0.122	Ⅱ
C11	0.004	-0.023	-0.026	-0.028	-0.032	Ⅰ
C12	-0.007	0.012	-0.014	-0.022	-0.027	Ⅱ
C13	-0.060	-0.048	-0.014	0.028	-0.029	Ⅳ
压力层	-0.240	-0.189	-0.118	-0.011	-0.177	Ⅳ
状态层	0.011	-0.015	-0.158	-0.208	-0.247	Ⅰ
响应层	-0.068	-0.036	-0.028	0.005	-0.056	Ⅳ
生态安全评价	-0.296	-0.239	-0.304	-0.214	-0.480	Ⅳ

“优秀”，尽管有个别年份如南木林县 2009 年、白朗县 2003 年出现生态安全水平“较差”的情况。日喀则市区生态安全等级的变化大体分为 3 个阶段，20 世纪以前生态安全为“优秀”，步入 20 世纪后，到 2008 年，生态安全持续“差”，2009 年以后生态安全转为“优秀”。山南地区总体来看生态安全最为优秀，除贡嘎县在 2004—2005 年及 2008—2009 年出现生态安全“差”的情况，其余各县自 20 世纪 80 年代以来，生态安全始终保持优秀，农业开发对耕地生态安全的影响较小。总体来看，20 世纪以前，各县耕地生态安全基本处于“优秀”水平，而 2005 年以后，即经历农业开发时期后，各县耕地生态安全等级下降，主要呈现“中等”水平。相比较而言，“一江两河”日喀则地区、山南地区各县域生态安全基本能

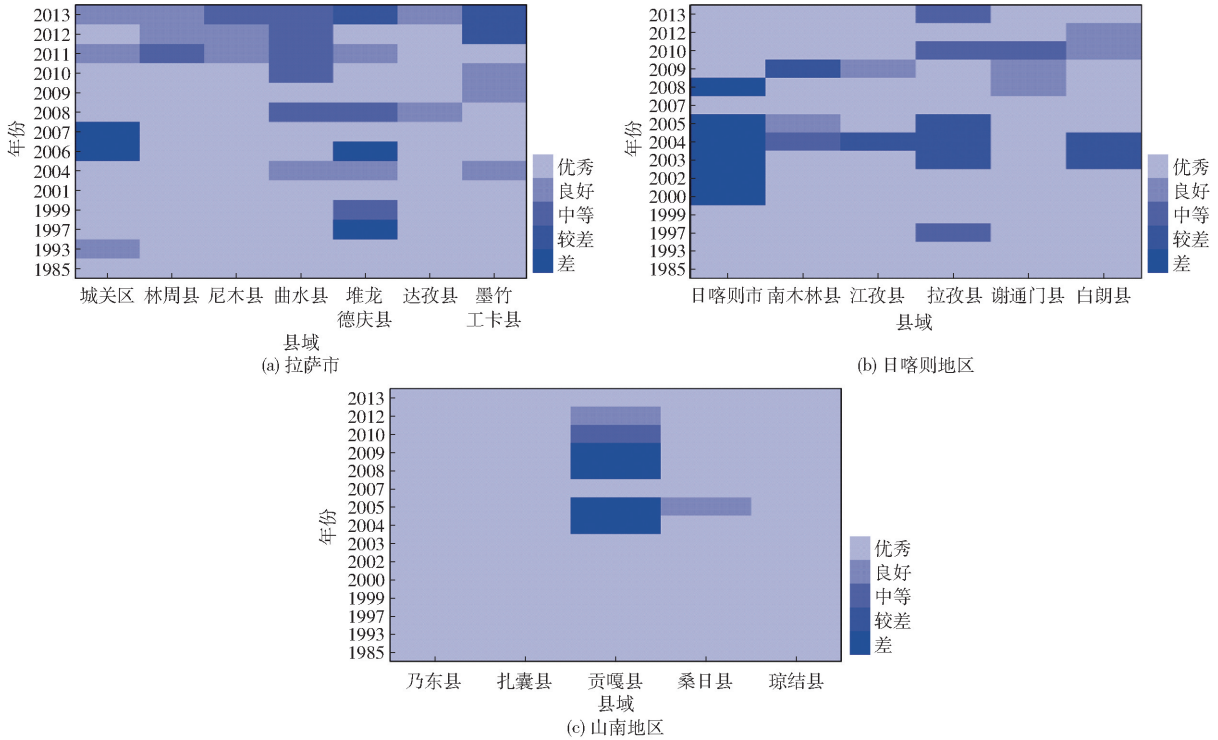

图 3　“一江两河”地区农业开发对耕地生态安全的影响

Fig. 3　Impact of agricultural development on ecological security of cultivated land in “one river and two tributaries” area

保持较好的状态,农业活动对耕地生态安全的影响较小。但在拉萨市各县,由于农业活动增强,耕地生态安全水平呈现下降趋势。

3.2.3 耕地生态安全空间特征

由于“一江两河”地区 2005 年后耕地生态安全等级明显下降,因此选取 2004、2010、2013 年作为典型年,对比分析不同典型年下,各县域之间的生态安全水平差异。图 4 为各典型年内 18 个县耕地生态安全的空间分异性,采用自然间断点分级法对综合关联度进行分类,综合关联度指数越小说明该县生态安全问题更突出,耕地生态安全发展不协调。可以看出,较“一江两河”地区整体水平来看,2004 年贡嘎县,2010 年曲水县、尼木县、城关区、达孜县、林周县,以及 2013 年堆龙德庆县、林周县和墨竹工卡县农业开发对耕地生态安全问题的危害更大,农业活动和生态保护的协调一致性有待提高。整体来看,2004 年“一江两河”地区整体的耕地生态安全水平较为一致,未出现明显的参差不齐情况。2010、2013 年拉萨市各县的耕地生态安全水平较为落后。在不同典型年下,耕地生态安全水平处于落后的县域不同,说明各个县的生态安全水平波动较大,政府仍应该加强统一监管力度,保证“一江两河”农耕区的协调稳定发展。

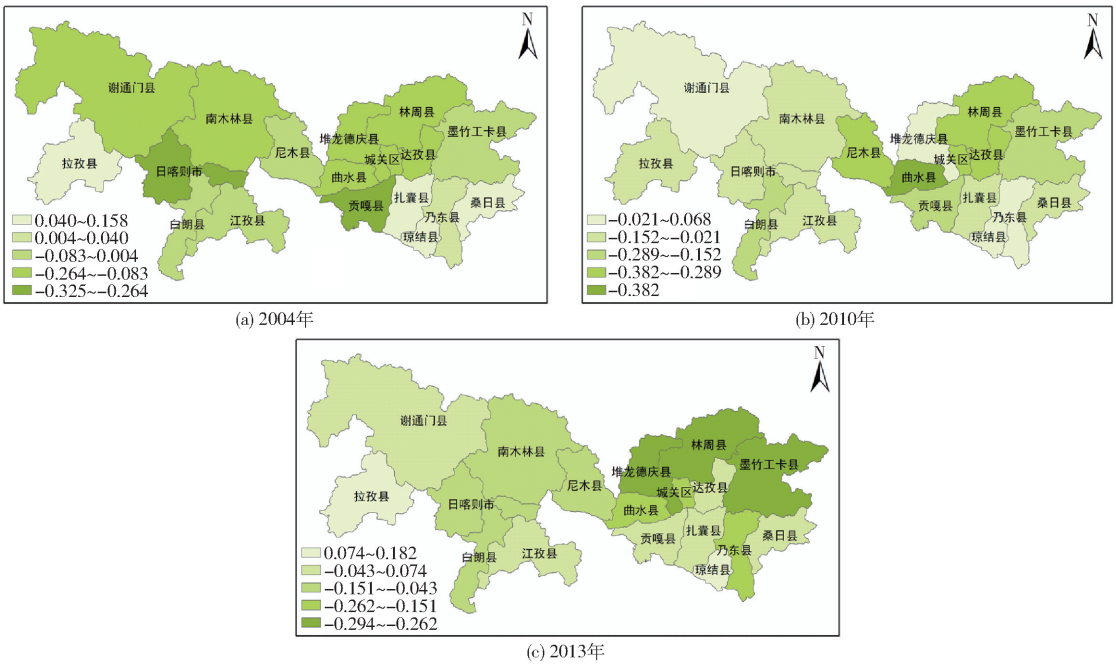

图 4 “一江两河”地区各县生态安全综合关联度指数

Fig. 4 Comprehensive correlation index of ecological security in “one river and two rivers” area

3.3 耕地生态安全障碍度诊断

由表 4 可知,“一江两河”地区各县域的障碍因子具有区域相似性和明显的空间异质性。在拉萨市,单位面积氮肥施用量 C3、单位面积磷肥施用量 C4、以及单位面积农业机械总动力 C2 这 3 个指标对各县耕地生态安全影响的障碍度普遍排序靠前,表明拉萨市各县都承受化肥施用量高的压力,外加农业机械化水平不高而限制了耕地生态安全。指标如单位面积钾肥施用量 C5、单位面积农药施用量 C6 只在拉萨市个别县存在障碍,说明这 2 项因子对耕地生态安全的影响微弱,而其他障碍度较小的指标对耕地生态安全的影响基本可以忽略。类似地,日喀则地区各县的耕地生态安全受单位面积钾肥施用量 C5、人均耕地面积 C1 以及单位面积磷肥施用量 C4 的影响较大,个别县也受到单位面积农药施用量 C6、有效灌溉面积比重 C12 以及旱涝保收面积比重 C13 这 3 个指标的影响。山南地区各县的耕地生态安全主要受到单位面积农药施用量 C6、单位面积钾肥施用量 C5 以及单位面积塑料薄膜使用量 C7 这 3 个指标的限制,单位面积氮肥施用量 C3 以及单位面积磷肥施用量 C4 仅在个别县域存在限制性。此外,相似性也表现在“一江两河”地区的耕地生态安全普遍与各种类化肥施用量相关,不同成分的化肥施用量的障碍度较高。其他指标如水功能区水质达标率 C11 均未对耕地生态安全产生限制。而异质性一方面表现在剩余指标在各县(市、区)发生障碍的作用有所差异,即不同的县域的障碍因子不完全相同,另一方面也表现在拉萨市、日喀则地区以及山南地区 3 个地区的障碍因子的差异性。如单位面积塑料薄膜使用量 C7 仅在山南地区对耕地生态安全发生障碍作用,事实上,山南地区设施农业发展较快,塑料薄膜施用量

较大，因此对耕地生态安全的影响更为显著。此外，从 PSR 模型角度可以看出，障碍度较高的因子基本为压力指标，个别县域的障碍因子来源于响应指标，而状态指标对耕地生态安全的影响较为微弱，说明政府对当地耕地生态安全的保护从源头采取措施将更为有效。

表 4　“一江两河”地区耕地生态安全障碍诊断结果

Tab. 4　Diagnosis of ecological security barriers of cultivated land in “one river and two tributaries” area

地区	指标排序	城关区		林周县		尼木县		曲水县		堆龙德庆县		达孜县		墨竹工卡县		平均	
		障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%
拉萨市	1	C13	21.92	C3	38.96	C4	29.82	C2	25.98	C3	15.19	C4	21.75	C2	18.56	C3	17.26
	2	C5	13.84	C2	13.78	C5	12.31	C4	18.49	C6	13.01	C3	19.55	C4	16.79	C4	16.08
	3	C9	12.01	C4	13.34	C6	9.97	C5	13.43	C2	12.18	C6	18.34	C3	15.63	C2	12.96

地区	指标排序	日喀则市		南木林县		江孜县		拉孜县		谢通门县		白朗县		平均	
		障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%
日喀则地区	1	C1	18.31	C13	18.07	C2	16.09	C1	34.05	C6	24.99	C5	22.27	C5	18.85
	2	C4	17.99	C5	15.43	C12	14.28	C4	19.96	C2	19.05	C6	12.76	C1	15.45
	3	C3	12.29	C4	13.85	C3	13.96	C12	7.35	C1	16.25	C4	11.91	C4	14.47

地区	指标排序	乃东县		扎囊县		贡嘎县		桑日县		琼结县		平均	
		障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%
山南地区	1	C6	23.48	C5	22.95	C6	32.16	C5	28.65	C5	27.32	C6	19.86
	2	C4	22.29	C2	13.09	C1	9.01	C3	26.03	C6	23.42	C5	16.61
	3	C7	20.73	C6	12.83	C3	8.07	C4	8.96	C7	22.04	C7	11.42

4　结论

（1）西藏“一江两河”地区农业活动强度较大，受耕地资源限制，为满足粮食生产需求，化肥施用量大幅增加，农药施用量年际波动较大，给生态安全带来隐患。

（2）20 世纪以前，各县耕地生态安全基本处于“优秀”水平；2000—2010 年，各县耕地生态安全等级下降，逐步向“差”转化；2010 年以后，耕地生态安全有改善趋势，逐渐恢复为“优秀”或“良好”。

（3）西藏“一江两河”地区整体的耕地生态安全发展水平较为一致，仅个别县域生态安全水平较为落后，政府仍需加强统一监管力度，保证“一江两河”农耕区的协调稳定发展。

（4）区域耕地生态安全障碍因子具有相似性和差异性双重特征。“一江两河”地区的耕地生态安全主要与单位面积氮肥、磷肥施用量有关。拉萨市各县的单位面积农业机械总动力、日喀则地区人均耕地面积以及山南地区单位面积塑料薄膜使用量也是限制耕地生态安全的主要因素。

参　考　文　献

[1] 关兴良，方创琳，鲁莎莎. 中国耕地变化的空间格局与重心曲线动态分析[J]. 自然资源学报，2010，25(12)：1997－2006.
GUAN Xingliang，FANG Chuanglin，LU Shasha. Analysis of spatial distribution and gravity centers curve dynamic cultivated land changes in China[J]. Journal of Natural Resources，2010，25(12)：1997－2006.（in Chinese）

[2] 张戈丽，欧阳华，周才平，等. 近 50 年来气候变化对西藏“一江两河”地区农业气候热量资源的影响[J]. 资源科学，2010，32(10)：1943－1954.
ZHANG Geli，OUYANG Hua，ZHOU Caiping，et al. Response of agricultural thermal resources to climate change in the region of the Brahmaputra River and its two tributaries in Tibet during past 50 years[J]. Resources Science，2010，32(10)：1943－1954.（in Chinese）

[3] 张华国. 西藏“一江两河”农业生态流域发展高原现代农业问题[J]. 西藏农业科技，2015，37(3)：1－5.
ZHANG Huaguo. Tibet “one river and two streams” agro-ecological basin on the plateau of modern agriculture development and countermeasures[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences，2015，37(3)：1－5.（in Chinese）

[4] 刘毅华，董玉祥. 西藏“一江两河”中部流域地区土地沙漠化变化的驱动因素分析[J]. 中国沙漠，2003，23(4)：21－26.
LIU Yihua，DONG Yuxiang. Driving factors of sandy desertification change in the middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries in Xizang[J]. Journal of Desert Research，2003，23(4)：21－26.（in Chinese）

[5] 张伟民，董光荣，屈建军，等. 西藏“一江两河”流域中部地区沙漠化土地类型及其分布规律[J]. 干旱区资源与环境，1994，8(3)：80－87.
ZHANG Weimin，DONG Guangrong，QU Jianjun，et al. Types and distributive regulation of decertified lands in the middle reaches of Yalutangpo River，Tibet[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，1994，8(3)：80－87.（in Chinese）

[6] 陶和平，高攀，钟祥浩. 区域生态环境脆弱性评价——以西藏“一江两河”地区为例[J]. 山地学报，2006，24(6)：761－768.

TAO Heping, GAO Pan, ZHONG Xianghao. A study of regional eco-environment vulnerability—a case of "one-river-two-tributaries", Tibet[J]. Mountain Research, 2006, 24(6): 761 - 768. (in Chinese)
[7] 张华国. 试论新时期西藏"一江两河"农业生态流域资源开发和经济发展的生态环境问题及对策[J]. 西藏农业科技, 2017, 39(2): 40 - 44.
[8] 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260 - 266.
YU Jian, FANG Li, CANG Dingbang, et al. Evaluation of land eco-security in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model[J]. Transactions of the CASE, 2012, 28(5): 260 - 266. (in Chinese)
[9] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 316 - 322.
HUANG Huiling, LUO Wenbin, WU Cifang, et al. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 316 - 322. (in Chinese)
[10] 王大海, 张荣群, 艾东, 等. 基于 EES - PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 228 - 237.
WANG Dahai, ZHANG Rongqun, AI Dong, et al. Empirical study on evaluation method of land ecological security matter-element model based on EES - PSR [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 228 - 237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s036&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.036. (in Chinese)
[11] 杨建宇, 张欣, 李鹏山, 等. 基于物元分析的区域土地生态安全评价方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 238 - 246.
YANG Jianyu, ZHANG Xin, LI Pengshan, et al. Evaluation method of regional land ecological security based on matter-element analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 238 - 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s037&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.037. (in Chinese)
[12] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 等. 锡林郭勒盟生态安全评价及生态调控途径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 228 - 236.
SHI Na'na, XIAO Nengwen, WANG Qi, et al. Ecological security evaluation and ecological regulation approach in Xilin Gol League[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 228 - 236. (in Chinese)
[13] NEWTON A, BRITO A C, ICELY J D, et al. Assessing, quantifying and valuing the ecosystem services of coastal lagoons [J]. Journal for Nature Conservation, 2018, 44: 50 - 65.
[14] RAPHAEL S, AUDE J, AURELIEN B. An integrative approach to assess ecological risks of surface water contamination for fish populations[J]. Environmental Pollution, 2017, 220(38): 588 - 596.
[15] CHU Xi, DENG Xiangzheng, JIN Gui, et al. Ecological security assessment based on ecological footprint approach in Beijing - Tianjin - Hebei region, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2017, 101: 43 - 51.
[16] LI Zhaotian, YUAN Mengjiao, HU Mengmeng, et al. Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP - DEMALTE model: a case study of the Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 595 - 602.
[17] BURGER J, GOCHFELD M, KOSSON D S, et al. Evaluation of ecological resources at operating facilities at contaminated sites: the department of energy's hanford site as a case study[J]. Environmental Research, 2019, 170: 452 - 462.
[18] LU Shasha, LI Junpu, GUAN Xingliang, et al. The evaluation of forestry ecological security in China: developing a decision support system[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 664 - 678.
[19] 西藏自治区统计局. 西藏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1989 - 2014.
[20] 拉萨市统计局. 拉萨市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006 - 2014.
[21] 日喀则市统计局. 日喀则市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008、2010.
[22] FAO Proceedings. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development[R]. Proceedings of Workshop Organized by the Land and Water Development Division FAO Agriculture Department, 1997.
[23] WALZ R. Development of environmental indicator system: experiences from Germany[J]. Environmental Management, 2000, 25(6): 613 - 623.
[24] 雷勋平, 吴杨, 叶松, 等. 基于熵权可拓决策模型的区域粮食安全预警[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 233 - 239.
LEI Xunping, WU Yang, YE Song, et al. Regional grain security pre-warning based on entropy weight extension decision model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 233 - 239. (in Chinese)
[25] 蔡元. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
[26] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057 - 1061.
ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057 - 1061. (in Chinese)
[27] 摆万奇, 尚二萍, 张镱锂. 西藏自治区拉萨河流域湿地脆弱性评价与成因分析[J]. 湿地科学, 2014, 12(1): 7 - 14.
BAI Wanqi, SHANG Erping, ZHANG Yili. Assessment and origin analysis on wetland vulnerability in Lhasa River Basin of Tibet Autonomous Region[J]. Wetland Science, 2014, 12(1): 7 - 14. (in Chinese)
[28] 王西琴, 吴若然, 李兆捷, 等. 我国农业用水安全的分区及发展对策[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1428 - 1434.
WANG Xiqin, WU Ruoran, LI Zhaojie, et al. Agricultural water security zoning and developmental countermeasures in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1428 - 1434. (in Chinese)
[29] 蒋和平, 崔凯. 我国粮食主产区农业现代化指标体系的构建和测算及发展水平评价[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(6): 646 - 651.
[30] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214 - 221.
LIU Qinpu. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 214 - 221. (in Chinese)
[31] 王激清, 马文奇. 五大因素影响化肥氮磷钾消费比例合理化[J]. 中国农资, 2006(6): 14 - 15.
[32] 陆华东. 新时期西藏扶贫指标及标准探讨[J]. 西藏科技, 2001(6): 11 - 14.
[33] 刘景辉, 王志敏, 李立军, 等. 超高产是中国未来粮食安全的基本技术途径[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(3): 161 - 165.
[34] 王玮, 郭铌, 沙莎, 等. 我国西北地区东部时间序列 NDVI 数据集重建方法比较研究[J]. 草业学报, 2016, 25(8): 1 - 13.
WANG Wei, GUO Ni, SHA Sha, et al. Comparative studies of reconstruction methods for the long term NDVI dataset in the east of Northwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(8): 1 - 13. (in Chinese)