

耕地生态安全评价研究

——以黑龙江省宁安市为例

徐 辉, 雷国平, 崔登攀, 赵宏波

(东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:耕地生态安全关系到可持续发展和粮食安全,以黑龙江省宁安市为研究区,从自然因素、经济因素和社会因素 3 方面构建了影响耕地生态安全的评价指标体系。运用组合赋权法确定其指标权重,采用多因素综合评价法,对宁安市 2000—2009 年耕地生态安全进行定量评价及分析。结果表明:2000—2009 年宁安市耕地生态安全水平处于“较安全—敏感—风险—敏感”的“U”型发展阶段,且总体上耕地生态安全程度相对较低,其中 2000—2001 年宁安市的耕地生态安全处于较安全状态,2002—2003 年处于敏感水平,2004—2006 年处于风险水平,2007—2009 年耕地生态安全状况有所回升,但仍处于敏感水平。依据分析结果,提出了提高宁安市耕地生态安全水平的相关建议。

关键词:耕地生态安全; 组合赋权法; 评价指标体系; 综合评价模型; 宁安市

中图分类号: F323.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)06-0180-05

Study on Evaluation for Ecological Security of Cultivated Land

—A Case Study of Ning'an City in Heilongjiang Province

XU Hui, LEI Guo-ping, CUI Deng-pan, ZHAO Hong-bo

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The ecological security of cultivated land is related to sustainable development and food security. Ning'an City in Heilongjiang Province was chosen as study area in this paper. Evaluation index system which affects cultivated land ecological security was constructed based on natural factors, economic factors and social factors. The optimal combination weighting method was used to determine index weights and multi-factor comprehensive evaluation method was adopted to quantitatively evaluate and analyze ecological security of cultivated land in Ning'an City from 2000 to 2009. The results show that: the level of the cultivated land ecological security in Ning'an City is the 'U'-type development stage of the 'relatively safe—sensitive—risk—sensitive', and the cultivated land ecological security degree is relatively low in general, among which the cultivated land ecological security of Ning'an City was at a relatively safe state in 2000—2001; the cultivated land ecological security was at a sensitive level in 2002—2003; the cultivated land ecological security was at the level of risk in 2004—2006; the cultivated land ecological security have a certain increase during 2007—2009, but still at a sensitive level. According to the analysis results, this paper proposes some related suggestions to increase the level of ecological security of cultivated land of Ning'an City.

Key words: cultivated land ecological security; combination weighting method; evaluation index system; multi-factor comprehensive evaluation model; Ning'an City

耕地资源作为最宝贵的土地资源,是人类生存和发展的基础,事关粮食安全,也是影响区域可持续发展的关键问题。近年来,随着我国人口、资源、环境之间矛盾的不断增大,诸如耕地数量不断减少、耕地质

量持续下降和耕地生态环境不断恶化等影响耕地生态安全的问题变得日益突出^[1-3]。

生态安全的概念最早由莱斯特·R·布朗于 1977 年提出^[4],一般指生物与环境的相互作用不会

导致个体或系统受到侵害和破坏,从而保障生态系统可持续发展的一种动态过程^[5]。耕地生态安全是生态安全的一个重要方面,当前国内学者对耕地生态安全的研究主要有:赵其国^[6]认为影响耕地资源生态安全的主要因素是人口增长、社会经济发展、土地利用方式以及土地利用技术水平等因素;张传华^[7]认为地形地貌和自然灾害是影响耕地资源生态安全的重要因素,耕地生态安全是指人类赖以生存和发展的耕地资源所处的生态环境,处于一种不受或少受威胁与破坏的健康、平衡状态;朱红波^[8-9]认为耕地资源生态安全是指耕地资源生态系统处于保持自身正常功能结构并能满足社会经济可持续发展需要的状态,影响因素可以分为直接、间接和社会经济因素。但由于研究对象的复杂性和特殊性,人们对其内涵认识不足,在评价指标体系和研究方法上还没有形成共识,多为宏观和静态研究,因而耕地生态安全评价研究滞后。

研究黑龙江省宁安市耕地生态安全具有极好的典型性和借鉴启示作用,旨在为科学的评价和衡量人类活动对区域耕地生态安全的影响提供一种有效的方法和理论支持,为政府制定耕地管理政策提供依据,促进耕地资源的可持续利用。

1 研究区概况

宁安市位于黑龙江省东南部,距哈尔滨市 320 km,市辖土地总面积为 35.2 万 hm^2 ,2009 年全市人口 44 万人,其中市属人口 37.8 万人。地区生产总值为 43.7 亿元,同比增长 10.6%,农业财政支出比重为 10.23%,农民年人均纯收入达到 4 785 元。耕地面积 14.5 万 hm^2 ,其中水田、水浇地面积 1.9 万 hm^2 ,旱地面积 12.6 万 hm^2 ,旱地占耕地比例从 2000 年的 87.40% 下降到 2009 年的 86.65%。近几年,随着宁安市社会经济的不断发展,工业化进程的日益加快,耕地生态安全状况不容乐观,一方面,农药使用量、化肥施用量呈连年增加的趋势,2009 年单位耕地面积农药使用量为 8.24 kg/hm^2 ,农药利用率仅为 30% 左右,70% 残留在耕地土壤中,对耕地资源生态安全造成严重威胁。化肥施用量达到 130.57 kg/hm^2 ,化肥施用量的持续增加和氮肥施用量偏高等造成耕地质量急剧退化,土壤结构变差、土壤产出能力和抗灾能力明显下降;另一方面,生活污水、工业废水和工业废气排放量呈逐年增长的趋势,在 2009 年达到 65.38 t/hm^2 、37.28 t/hm^2 、28.37 万 m^3/hm^2 ,耕地受污染严重;同时,宁安市又受到低温冷害、旱灾、洪涝等自然灾害的影响,加之水土流失,致使耕地生态环境恶化和地力下降。

2 资料来源与数据处理

2.1 资料来源

原始数据来源于《宁安市统计年鉴》(2000—2009 年)、《宁安市国民经济和社会发展统计公报》(2000—2009 年)、《宁安市土地利用总体规划(2006—2020 年)》、《黑龙江省统计年鉴》(2000—2009 年)及宁安市国土部门、统计部门和规划部门的相关资料。

2.2 数据处理

对初始数据进行无量纲化(或标准化)处理,是评价宁安市耕地生态安全的基础。指标值越大对耕地生态安全越有利时,采用正向指标计算公式进行标准化处理;指标值越小对生态安全越好时,采用负向指标计算公式进行标准化处理。计算公式具体为:

$$\text{正向指标: } Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } Z_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

式中: x_{ij} ——第 i 年第 j 指标的原值; Z_{ij} ——第 i 年第 j 指标标准化后的数值; $\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ ——第 j 指标的最大值、最小值。

3 研究思路与方法

本文尝试结合宁安市生态环境和土地利用结构特点,从自然、经济和社会 3 个角度构建耕地生态安全评价指标体系,运用最优组合赋权法确定权重,建立耕地生态安全综合评价模型,对 2000—2009 年宁安市耕地生态安全状况进行动态评价和分析,最后从耕地资源可持续利用的角度,提出提高宁安市耕地生态安全水平的对策。

3.1 评价指标体系的构建

本文认为耕地生态安全是指在一定时间和空间尺度内,能够保证自然、经济和社会系统相互协调作用下,耕地生态系统有稳定、均衡、充裕的自然资源可供利用。结合研究区实际情况,在借鉴国内外其他学者研究成果的基础上^[10],依据科学性、全面性、代表性和可操作性原则,基于自然因素、经济因素和社会因素 3 方面建立影响研究区耕地生态安全的指标体系。将评价体系分为目标层、准则层和指标层 3 个层面,其中耕地生态安全为目标层;自然因素、经济因素和社会因素为准则层;选取 19 个评价指标为指标层,构建了宁安市耕地资源安全评价指标体系(表 1)。

3.2 指标权重值确定

为了使指标权重更能符合实际情况,本文指标权重确定采用的是最优组合赋权法,即将主观赋权法与

客观赋权法相结合的综合评价方法,该方法突破单一方法确定权重的局限,将主观赋权法(本文采用层次分析法)和客观赋权法(本文采用熵值法)这两种方法所得到的权重系数按照最优组合赋权法结合起来,客观地反映各指标层对目标层的影响程度。

(1)确定主观权重向量。层次分析法确定的指标权重向量为: $W_1=(W_1, W_2, \dots, W_{19})^T$ 。

(2)确定客观权重向量。熵值法确定指标权重向量为: $W_2=(W_1^*, W_2^*, \dots, W_{19}^*)^T$ 。

(3)确定组合权重向量。设最优组合权重系数为: $W_C=(W_{C1}, W_{C2}, \dots, W_{C19})^T$;令: $W_C=\theta_1 W_1+\theta_2 W_2$ 。式中: θ_1, θ_2 ——组合权重系数向量的线性表出系数, $\theta_1, \theta_2 \geq 0$,且满足单位化约束条件: $\theta_1^2+\theta_2^2=1$ 。组合权重确定的指标权重值及标准化值如表 2 所示。

表 1 宁安市耕地生态安全评价指标体系

目标层 A	准则层 B	指标层 C	安全变化趋势
耕地生态安全综合评价	自然因素	人均耕地面积 C_1 ($\text{hm}^2/\text{人}$)	正趋向
		未利用地面积比重 $C_2/\%$	正趋向
		森林覆盖率 $C_3/\%$	正趋向
		旱田面积占耕地面积的比重 $C_4/\%$	负趋向
		耕地土壤有机质含量 $C_5/\%$	正趋向
		土地垦殖率 $C_6/\%$	正趋向
	经济因素	GDP 增长率 $C_7/\%$	正趋向
		农业财政支出比重 $C_8/\%$	正趋向
		农民人均纯收入 $C_9/\text{元}$	正趋向
		单位耕地面积农业机械动力 $C_{10}/(\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2})$	正趋向
		单位耕地面积农用排灌机械动力 $C_{11}/(\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2})$	正趋向
		单位耕地面积化肥施用量(折纯) $C_{12}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	负趋向
		单位耕地面积农用塑料薄膜使用量 $C_{13}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	负趋向
		单位耕地面积农药施用量 $C_{14}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	负趋向
	社会因素	城市化水平 $C_{15}/\%$	负趋向
		耕地压力指数 $C_{16}/\%$	负趋向
		人口密度 $C_{17}/(\text{人} \cdot \text{hm}^{-2})$	负趋向
		人口自然增长率 $C_{18}/\%$	负趋向
		人均粮食占有量 $C_{19}(\text{t}/\text{人})$	正趋向

表 2 综合评价参数表

指标	权重 W_{ij}	标准化值									
		2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
C_1	0.022	0.088	0.477	0.749	0.000	0.022	1.000	0.218	0.190	0.229	0.122
C_2	0.044	1.000	0.938	0.620	0.467	0.347	0.223	0.182	0.139	0.088	0.000
C_3	0.015	0.850	0.342	0.641	0.103	1.000	0.585	0.000	0.184	0.684	0.953
C_4	0.026	0.822	0.871	0.936	1.000	0.904	0.892	0.924	0.924	0.854	0.000
C_5	0.047	1.000	0.918	0.872	0.790	0.545	0.431	0.302	0.163	0.098	0.000
C_6	0.040	0.059	1.000	0.000	0.004	0.017	0.022	0.042	0.041	0.049	0.203
C_7	0.123	0.283	0.236	0.000	0.331	0.425	0.622	0.496	1.000	0.945	0.858
C_8	0.066	0.000	0.130	0.094	0.265	0.375	0.459	0.605	0.747	0.866	1.000
C_9	0.119	0.025	0.076	0.000	0.083	0.224	0.272	0.410	0.562	0.755	1.000
C_{10}	0.050	0.000	0.128	0.256	0.331	0.357	0.374	0.425	0.500	0.932	1.000
C_{11}	0.014	0.567	0.000	0.609	0.607	0.598	0.597	0.602	0.623	0.809	1.000
C_{12}	0.040	0.690	1.000	0.695	0.749	0.450	0.472	0.000	0.026	0.498	0.081
C_{13}	0.040	0.906	1.000	0.774	0.730	0.746	0.576	0.509	0.435	0.273	0.000
C_{14}	0.135	1.000	0.987	0.887	0.859	0.686	0.642	0.304	0.207	0.089	0.000
C_{15}	0.023	1.000	0.000	1.000	0.739	0.542	0.216	0.150	0.346	0.608	1.000
C_{16}	0.030	1.000	0.819	0.653	0.546	0.426	0.324	0.278	0.171	0.083	0.000
C_{17}	0.009	0.277	0.185	0.123	0.000	0.062	1.000	0.862	0.769	0.892	0.154
C_{18}	0.049	0.000	0.066	0.247	0.709	0.519	0.677	0.766	0.684	0.778	1.000
C_{19}	0.108	0.116	0.138	0.000	0.059	0.293	0.513	0.597	0.640	0.736	1.000

3.3 评价模型

考虑到耕地生态安全影响因素的多样性,本研究采用多因素综合评价的方法对宁安市耕地生态安全进行综合评价。即设计指标体系、求取各指标的权重和指标值,然后对各指标进行无量纲化处理后,通过加权评分求取评价对象的耕地生态安全水平。其计算公式为:

$$F=\sum W_i\times P_i\tag{3}$$

式中: F ——耕地生态安全水平; W_i ——指标 i 的综

合权重; P_i ——指标 i 的标准化值。

3.4 评价标准

在耕地生态安全评价指标体系中,每项指标都可从不同侧面反映耕地生态安全状况,为全面反映耕地资源生态系统的总体安全状况,采用综合评价法,逐层逐项对各指标进行加权评分,得到区域耕地生态安全综合指数 F 如表 3 所示,将 F 取值范围 $0\sim 1$ 分为 5 个区间,并依次对应 5 个等级,对系统特征进行描述^[11]。

表 3 耕地生态安全分级和系统标准

F	等级	特征
≥ 0.9	安全(Ⅰ)	耕地生态环境基本未受到干扰破坏,耕地生态系统结构完整、功能较强,土地肥沃,无农业污染,植被覆盖率高,无沙化、碱化现象,生态问题不显著
$0.7\leq F<0.9$	较安全(Ⅱ)	耕地生态环境受到干扰,耕地生态系统结构尚完整,功能尚好,土壤肥力高,农业污染程度低,农业与畜牧业产量高,土地利用程度高,水土协调性好,生态问题不显著
$0.6\leq F<0.7$	敏感(Ⅲ)	耕地生态环境受到较少破坏,耕地生态系统结构有恶化趋势,但尚能维持基本功能,受干扰后易恶化,盐碱化程度较高,土壤肥力降低,生态问题显现
$0.4\leq F<0.6$	风险(Ⅳ)	耕地生态环境受到较大破坏,耕地生态系统结构恶化较大,功能不全,受外界干扰后恢复困难,盐碱化程度高,治理困难,一般为低产田,生态问题较大,生态灾害较多
<0.4	恶化(Ⅴ)	耕地生态环境受到很大破坏,耕地生态系统结构残缺不全,功能低下,发生退化性变化,恢复与重建很困难,耕地表现为无法耕作的光板地,生态灾害严重,农民背井离乡

表 4 2000—2009 年宁安市耕地生态安全评价值

项目	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
F	0.76	0.73	0.68	0.60	0.57	0.55	0.58	0.60	0.62	0.65
级别	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

4 评价结果与分析

根据已构建的指标体系和前述方法,对宁安市 2000—2009 年耕地生态安全的相关数据进行收集和整理。通过计算,得到宁安市 2000—2009 年耕地生态安全的评价值(表 4)。

以上数据表明,在 2000—2009 年宁安市耕地生态安全水平处于“较安全—敏感—风险—敏感”的“U”型发展阶段。

4.1 2000—2001 年耕地生态较安全

2000—2001 年由于人们的活动对耕地生态环境影响较小,虽然耕地生态环境受到一定的干扰,但是耕地生态系统结构尚完整,功能尚好;耕地有机质含量较高,使土壤肥力保持在一个较高的水平;人们对耕地化肥、农药和农用塑料薄膜使用量比较少,农业污染程度低,这一时期的水土协调性好,耕地生态问题不显著,处于较安全水平。

4.2 2002—2003 年耕地生态安全处敏感水平

2002—2003 年由于人口增长较快,加之年降水量的下将,旱地面积的比重增加和盐碱化程度的提高,使得土地压力大大提高;还有单位耕地面积农用

塑料薄膜使用量和单位耕地面积农药施用量都有不同程度的提高,从而导致耕地土壤肥力的下降。宁安市单位耕地面积农药施用量从 2000 年的 3.21 kg/hm^2 增加到 2003 年的 3.78 kg/hm^2 ,而耕地有机质含量从 2000 年的 11.32% 下降到 2003 年的 10.55% 。总之,这段时期内受人类活动干扰,耕地生态系统结构有恶化趋势,耕地污染严重,耕地肥力不足,土地压力加大,生态问题显现,耕地生态安全处敏感水平。

4.3 2004—2006 年耕地生态安全处风险水平

2004—2006 年耕地生态环境受到较大破坏,耕地生态系统结构恶化较大,功能不全,生态问题较大。这是由于在这一时期,大部分农民加大对耕地在农药、化肥及农用塑料薄膜使用量的投入,片面追求经济价值而忽略了耕地自身的调节能力,导致耕地内部环境遭到破坏,农民大多采用重产出、轻投入的掠夺式经营方式,在耕作上重化肥轻有机肥,导致地力不断下降,部分农田有机质含量逐年降低。有些农民一味在肥力低、耕作层浅薄、酸度大的旱地上种植豆类等作物,造成水土流失侵蚀农田,工业废水污染农田,工业废渣侵占土地,导致农田质量下降,土地资源破坏,农作物产量相对偏低,耕地潜力未充分发挥;这一

时期的自然灾害也是耕地生态安全遭到破坏的原因,2005年6月,黑龙江宁安市沙兰镇沙兰河上游山区突降暴雨,瞬间形成洪峰,引发泥石流,导致水土流失,水土流失最大的危害在于导致耕地减少、土层变薄、肥力下降,地质生态环境变差,因水土流失导致土壤中的氮、磷、钾纯量损失严重,致使耕地土壤资源质量不断退化,严重影响耕地生态安全。

4.4 2007—2009年耕地生态安全又处于敏感水平

这一时期较2004—2006年耕地生态安全系数有一些提高,但还是处于敏感水平。这是由于人们意识到耕地生态安全问题已经影响到耕地的产出水平,政府加大了对耕地生态环境的投入,宁安市在追求经济效益的同时,更加注重对耕地生态环境的保护。这一时期,加强了对泥石流等自然灾害的控制;同时,宁安市政府在沙兰镇玄武岩台地的土地整理工程也收到了一定的成效,使宁安市的粮食生产能力大大加强。虽然这一时期政府加大了对耕地生态环境管制,但是由于宁安市城市建设进度的加快,新增建设用地占用了一部分的优质耕地,面积上实现了“占一补一”,可是补充耕地的质量难以达到被占用耕地的质量,“占优补劣”问题仍然存在,使耕地存量隐性减少;农业生态环境由于受气候、水分、自然灾害等的影响,非旱即涝,灾害频繁,虽说近几年加强了对水土流失的综合治理,但是仍有一些水利设施陈旧老化,造成山塘、水库、灌溉渠道淤积,影响灌溉效益的发挥。由于各地挖矿采石、挖屋基、修建公路、铁路等基础设施建设以及农民开发丘陵山地种茶种果时,没有完成配套工程,造成局部水土流失加剧。另外,环境污染加重,工业化和城镇化导致大量的工业废水、重金属元素等排入水体和土壤,造成耕地肥力下降,为农产品安全带来较大隐患。

从总体上看,2000—2009年宁安市耕地生态安全水平多数年份较低,但有很大提升空间。而近几年其生态安全水平在逐步回升,说明人们意识到了耕地生态安全的重要性,采取了多种措施保护耕地质量,稳定粮食产量,不断协调影响耕地生态安全的自然、经济和社会因素,从而提高耕地生态安全水平。

5 结论与讨论

本文在总结国内外有关理论研究的基础上,结合实际情况,从影响耕地生态安全水平的自然、经济、社会3方面选取19个指标,构建适合宁安市耕地生态安全水平的评价体系,运用组合权重法和综合评价法对宁安市2000—2009年间的耕地生态安全水平进行

评价,研究结果表明,2000—2009年间宁安市耕地生态安全水平处于“较安全—敏感—风险—敏感”的“U”型发展阶段。宁安市耕地生态安全水平存在一定的差异,且总体上耕地生态安全程度相对较低,表现为:(1)2000—2001年宁安市耕地生态安全水平处于较安全状态;(2)2002—2003年宁安市耕地生态安全变化情况为耕地生态安全水平处于敏感水平;(3)2004—2006年宁安市耕地生态安全变化情况为耕地生态安全水平处于风险水平;(4)2007—2009年宁安市耕地生态安全变化情况较2004—2006年耕地生态安全系数有一些提高,但还是处于敏感水平。

鉴于以上分析结果,本文提出应从加大环境污染治理与生态环境保护的力度,加快生态退化区、脆弱区的生态建设和恢复,搞好城市绿化和景观生态建设;推进宁安市土地整治建设,提高土地利用率,建设高效农田生态复合系统,补偿和恢复土地的生态功能,减少水土流失;合理使用农药、化肥,减少对土壤的污染,运用生物和化学方法对土壤进行改良;加强农业基础设施的建设,改善农业生产条件,改进耕作制度;强化耕地保护意识,提高人口素质,控制人口数量等几个方面来逐步提高宁安市耕地生态安全水平。只有因地制宜的采取合理措施才能确保宁安市耕地利用生态安全整体水平快速而稳定的发展。

耕地生态安全是一个复杂的系统和一个动态变化的过程,随着社会经济的发展,耕地生态安全水平也会随之变化。本文对研究区10a间的耕地生态安全进行研究,时间序列仍较短,而宁安市耕地生态安全变化是一个长期演化的过程,因而在今后的研究工作中,应拉长研究的时间序列,以便得到更加合理的评价结果,使研究结果更具指导意义。同时,还应根据研究区域经济发展的不同阶段对指标进行修正和调整,选择合适的方法进行评价、分析和判断,以便更好地指导土地利用行为。

参考文献:

- [1] 封志明. 中国未来人口发展的粮食安全与耕地保障[J]. 人口研究, 2007, 31(2): 15-29.
- [2] 陈百明. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001: 9-16.
- [3] 倪绍祥, 谭少华. 江苏省耕地安全问题探讨[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 307-312.
- [4] 莱斯特·R·布朗. 建设一个持续发展的社会[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1984.
- [5] 王振祥, 朱晓东, 石磊, 等. 安徽省沿淮地区生态安全评价模型和指标体系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2431-2435.

(3)葡萄园土壤—叶片—大气连续体中水分势能分布规律明显。在连续体中,土壤阻力的最大值约为最小值的 1 425.66 倍,植株体内水流阻力最大值是最小值的 3.08 倍,而葡萄叶—气系统水流阻力的最大值是最小值的 3.51 倍。在各水流阻力中,叶—气系统水流阻力最大,占该连续体中水流总阻力的 98.8%~99.0%,植株体内水流传输阻力次之,占该连续体中水流总阻力的 1.0%~1.2%,土壤阻力最小,占该连续体中水流总阻力的比例可忽略不计。

参考文献:

- [1] 冷石林,石培华. SPAC 水流阻力的确定[J]. 中国农业气象,1993,14(6):43-46.
- [2] 康绍忠. 土壤—植物—大气连续体水分传输动力学及其应用[J]. 力学与实践,1993,15(1):11-19.
- [3] 邵明安. 根木质部水流阻力 Poiseuille 公式计算值与实测值的差别[J]. 水利学报,1993(12):61-64.
- [4] 康绍忠,熊运章,王振镒. 土壤—植物—大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究[J]. 水利学报,1990(7):1-9.
- [5] 景卫华,贾忠华,罗纳. 总水势概念的定义、计算及应用条件[J]. 农业工程学报,2008,24(2):27-31.
- [6] 郭庆荣,张秉刚,钟继洪,等. 南亚热带丘陵赤红壤—龙眼

—大气连续体水分运移力能变化及分布规律[J]. 生态科学,1993,4(3):260-266.

- [7] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水力电力出版社,1994.
- [8] 张喜英,刘孟雨,雷玉平. 土壤—植物—大气连续体水分运移阻力的田间试验与模拟研究[J]. 中国农业气象,1995,16(2):33-36.
- [9] 徐军亮,马履一,王华田. 油松人工林 SPAC 水势梯度的时空变异[J]. 北京林业大学学报,2003,25(5):1-5.
- [10] 杨晓光. 夏玉米农田 SPAC 系统水分传输势能及其变化规律研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(1):27-29.
- [11] 康绍忠,刘晓明. 玉米生育期土壤—植物—大气连续体水流阻力与水势的分布[J]. 应用生态学报,1993,4(3):260-266.
- [12] 张斌,丁献文,张桃林,等. 干旱季节不同耕作制度下红壤—作物—大气连续体水流阻力变化规律[J]. 土壤学报,2001,38(1):17-24.
- [13] Van den Honert T H. Water transport in plants as a catenary process[J]. Discussions of the Favaday Soc., 1948,3:146-153.
- [14] Cowan I R. Transport of water in the soil—Plant—atmosphere system[J]. J. Apply Ecology, 1965, 2: 221-239.

(上接第 179 页)

- [4] 杨晓晖,张克斌,慈龙骏. 半干旱农牧交错区近 20 年来景观格局时空变化分析:以内蒙古伊金霍洛旗为例[J]. 北京林业大学学报,2005,27(5):81-86.
- [5] 高小红,王一谋,杨国靖. 基于 RS 与 GIS 的榆林地区景观格局动态变化研究[J]. 水土保持学报,2004,18(1):168-171.
- [6] 张银辉,罗毅,刘纪远,等. 内蒙古河套灌区土地利用与景观格局变化研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):61-65.
- [7] 吴波,慈龙骏. 毛乌素沙地景观格局变化研究[J]. 生态学报,2001,21(2):191-196.
- [8] 肖笃宁. 景观生态学理论方法与应用[M]. 北京:中国林业出版社,1991:92-98.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家

标准化管理委员会. GB/T21010—2007 土地利用现状分类(S).

- [10] Riitters K H, Neill R V O, Hunsaker C T. et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics[J]. Landscape Ecology,1995,10:23-39.
- [11] 李秀珍,布仁仓,常禹,等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. 生态学报,2004,24(1):123-134.
- [12] 张成梁,黄艺. 山西省煤矿区土地退化成因分析及生态恢复对策[J]. 农业环境科学学报,2006,25(增刊):711-715.
- [13] 徐跃通,杨燕杰,丁娟. 基于 GIS 和 RS 的煤矿区土地利用变化分析[J]. 矿业研究与开发,2009,29(3):35-37,46.
- [14] 卞正富,张燕平. 徐州煤矿区土地利用格局演变分析[J]. 地理学报,2006,61(4):349-358.

(上接第 184 页)

- [6] 赵其国,周炳中,杨浩,等. 中国耕地资源安全问题及相关对策思考[J]. 土壤,2002(6):293-302.
- [7] 张传华. 耕地生态安全评价研究:以重庆三峡库区为例[D]. 重庆:西南大学,2006.
- [8] 朱红波. 我国耕地资源生态安全的特征与影响因素分析[J]. 农业现代化研究,2008,29(2):194-197.

- [9] 朱红波. 我国耕地资源生态安全的时空差异研究[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(6):754-758.
- [10] 王军. 石家庄市耕地动态变化与生态安全评价研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2009.
- [11] 汤洁,朱云峰,李昭阳,等. 东北农牧交错带土地生态环境安全指标体系的建立与综合评价:以镇赉县为例[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(1):119-124.