

基于生态足迹模型的喀斯特高原山地 生态系统健康评价研究

张凤太^{1,2,3}, 苏维词^{4,5}, 赵卫权⁵, 梁玉华^{1,2}, 邵技新^{1,2}

(1. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 贵州师范学院
资源环境与灾害研究所, 贵州 贵阳 550003; 3. 南京大学 地理与海洋学院, 江苏 南京 210093;
4. 重庆师范大学 地理科学学院, 重庆 400047; 5. 贵州省科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 依据生态赤字占人均生态足迹比率, 建立了基于生态足迹的喀斯特高原山地生态系统健康评价标准。以毕节地区为例, 通过生态足迹的需求和生态承载力的计算得出, 在考虑化石燃料情况下, 毕节地区人均生态足迹需求为 2.9703 hm², 区域发展的人均生态足迹供给为 0.2679 hm², 人均生态赤字为 -2.7023, 人均生态赤字与生态足迹比率为 -0.8779, 反映了毕节地区生态系统整体处于病态状态。在不考虑化石燃料消耗对生态系统健康产生的后果前提下, 毕节试验区及所属 8 个县市均为亚健康状态和欠健康状态。在空间格局上, 毕节地区的生态系统健康状况由西北向北部、南部和东部地区逐渐变差; 在不考虑化石燃料的条件下, 生态系统健康状态的空间变化也大致从中心向周围方向变差。化石燃料、经济发展状况、人口密度大小及喀斯特出露面积(人地矛盾)对毕节喀斯特高原山地生态系统影响较大。

关键词: 生态足迹; 喀斯特生态系统; 健康评价; 毕节地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0256-06

中图分类号: X171

Ecosystem Health Assessment in Mountainous Areas of Karst Plateau Based on Ecological Footprint Model

ZHANG Feng-tai^{1,2,3}, SU Wei-ci^{4,5}, ZHAO Wei-quan⁵, LIANG Yu-hua^{1,2}, SHAO Ji-xin^{1,2}

(1. *Geography and Tourism Department, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550003, China;*

2. *Institute of Environment, Resources and Disaster, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550003, China;*

3. *College of Geography and Sea, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;* 4. *Department of Geography, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;* 5. *Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)*

Abstract: Based on the ratio of ecological deficit to per capita ecological footprint, evaluation criteria of ecosystem health were established in regard to ecological footprint for Bijie District. Using ecological footprint demand and ecological carrying capacity with consideration of fossil fuel consumption, the per capita ecological footprint demand of Bijie area was 2.9703 hm², per capita supply of ecological footprint for regional development was 0.2679 hm², per capita ecological deficit was -2.7023, and the ratio of per capita deficit to ecological footprint was -0.8779. The ecosystem of Bijie area as a whole is in an unhealthy state. Taking fossil fuel consumption out of the account, Bijie area and its eight counties were in sub-health or unhealthy states. In terms of the spatial pattern, the ecosystem health of Bijie area deteriorated from northwest to north, south and east directions. Without considering fossil fuel consumption, the ecosystem health of the area also deteriorated from the center to the surrounding areas. Fossil fuels, economic development, and population size and density impacted greatly the mountainous ecosystems of the exposed area the karst plateau.

Keywords: ecological footprint; karst ecosystem; health assessment; Bijie District

收稿日期: 2010-06-02

修回日期: 2010-08-06

资助项目: 国家科技支撑计划子项目“喀斯特山区生态环境动态监测关键技术集成与应用示范”(2007BAD53B001); 国家社科基金“西部少数民族地区发展模式创新研究”(10XJY044); 贵州省科学技术基金“喀斯特地区土地利用/覆被时空演变、驱动因子及生态效应研究”(黔科合 J 字[2009]2030 号); 贵州省教育厅青年基金“贵州省黔西南喀斯特地区土地利用/覆盖时空演变与生态效应”(黔教 2008060); 贵州省科技攻关计划(黔科合 S 字[2010]3015、黔科合 S 字[2007]1020); 贵州教育学院 2009 年校内重点课题

作者简介: 张凤太(1979—), 男(汉族), 山东省沂州市沂南县人, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为区域经济、景观生态、生态系统健康与管理等。E-mail: zhfthero@126.com。

生态系统健康是一个崭新的科学术语,指的是生态系统在保障正常的生态服务功能、满足合理的人类需求的同时,维持自身复杂性和持续发展的能力或状态。该术语由加拿大学者 Schaeffer 和 Rapport 于 1988 年首次提出^[1]。

生态系统健康评价作为一个新兴的科学领域,目前,其研究对象主要集中在城市、森林、农田、河流、湖泊、沼泽、海岸和海洋等不同类型的生态系统。研究区域上国内主要集中在中东部平原丘陵区、东部沿海区域、西部干旱半干旱区等^[2-4]。研究方法主要是通过指示物种或者通过活力、组织水平、系统恢复力;活力、恢复力、组织、生态系统服务功能;压力、状态、响应等方面选择指标,借助灰色关联、模糊数学、突变基数、主成分、GIS 等方法构建模型进行评价^[5],取得了一些初步成果。这些工作对于生态系统健康理论的丰富和完善具有重要意义。但由于喀斯特高原生态系统所处的特殊地域(有别于广西等喀斯特非高原生态系统),喀斯特高原生态系统健康的受胁迫因子及其作用机理、喀斯特生态系统演变的过程、方式、途径及其影响效应,都有别于其它地区生态系统的运行状况,而目前针对喀斯特地区的各类生态系统健康评价的系统研究十分缺乏,尤其是区别于指标数学模型方法的健康评价方法就更少。本文以毕节地区为例,基于生态足迹方法对喀斯特生态系统进行评价,对喀斯特生态系统健康研究具有重要借鉴意义。

1 研究区概况

研究区毕节地区辖毕节、大方、黔西、金沙、织金、纳雍、威宁、赫章 8 个县市,6 个街道办事处,98 个镇,146 个乡,其中 77 个为民族乡。该区域用地面积为 26 853 km²,2009 年末总人口 759.66 万人,人口密度为 283 人/km²。

该区位于滇东高原向黔中高原过渡的东斜坡地带,地势西高东低且随山势呈阶梯式下降。西部属云南高原向东的延伸部分,海拔高度一般在 2 000~2 400 m 左右,地形起伏平缓,沟谷交错,兼有伏流暗河,保存有较完整的高原面,是典型的喀斯特山区地貌。中部海拔 400~1 800 m。西部为高原、高中山地区,中部为中山区,东部为低中山丘陵区(附图 10)。

毕节试验区气候因地势起伏不平,山高坡陡,地面零星破碎,地方小气候差异十分明显。既有温暖带气候,也有亚热带气候和寒温带气候。东部四季分明,中部冬长夏短,西部冬长无夏,春秋相连。全区最热月(7 月)月平均气温 17.7~25 °C 月平均最低气温

-2.2~1.9 °C。区内雨量丰沛且雨热同季,全区有 5 个县年降水量在 1 000 mm 以上,2 个县接近 1 000 mm,降水量冬季最少,夏季最多。

2 生态足迹方法

生态足迹法是 Wackernagel 等 1996 年提出并发展的一种定量测度人类对自然利用程度的新方法,是将人类每一项最终的消费的量折算成提供生产该消费的原始物质与能量的生物生产性土地面积,将生态足迹的需求大小与供给(承载力)进行对比,评价研究对象的可持续状态。本文借助生态足迹来分析人类对喀斯特高原生态系统的干扰程度,确定生态系统的健康状况。

2.1 生态足迹的计算方法

$$E_F = \sum_{i=1}^n (P_i + I_i - E_i) E_{Q_i} / (N \cdot E_{P_i}) \quad (i=1, 2, 3, \dots, 6) \quad (1)$$

式中: E_F ——人均生态足迹; E_{P_i} ——全球平均产量; P_i ——资源生产量; I_i ——资源进口量; E_i ——资源出口量; E_{Q_i} ——等量化因子; N ——总人口, i ——生产空间类型。

生产空间类型主要考虑了 6 种,它们是矿物燃料用地、可耕地、林地、草地、建筑用地和水域。各类生态系统的生产力是不同的,为了将不同生态系统类型的空间汇总为区域的生物生产力和生态占用,各类型的生态系统面积需要乘以一个等量化因子,全球是一致的。本文采用的等量化因子如下^[6-7]:森林和化石能源用地为 1.1,耕地和建筑用地为 2.8,草地为 0.5,水域为 0.2。

2.2 生态承载力与生态赤字的计算

(1) 人均生态承载力表示某地区自然资源所能提供的人类生活生产能力。即一个地区的生态足迹供给。公式如下:

$$E_C = (\sum_{i=1}^n A_i E_{Q_i} Y_{F_i}) / N \quad (i=1, 2, 3, \dots, 6) \quad (2)$$

式中: E_C ——人均生态承载力; A_i —— i 类生态系统面积; E_{Q_i} ——等量化因子; N ——总人口数; Y_{F_i} ——产量因子(表 1)。

(2) 产量调整因子是所核算区域单位面积生物生产力与全球平均生产力相比较而得到的。如果该因子大于 1,那么意味着该地区单位面积的生态生产力或者废物吸收能力高于全球平均水平;如果低于 1 意味着该地区单位面积的生态生产力或者废物吸收能力低于全球平均水平。毕节位于亚热带—暖温带

的季风气候区域,光、温、水与生命活动的需求相匹配,是属于世界上生物学产量较高的区域,通过当地各种不同类型生产空间的生产力与全球平均生产力的比较,得出毕节地区的产量因子如表 1 所示。

表 1 毕节试验区各种生产空间的产量因子^[7-8]

生产空间类型	耕地/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	林地/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	水域/草地 (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	建设用地	
毕节地区	3 375	1.53	—	29	
世界平均	2 744	1.99	—	29	
产量因子	1.23	0.80	0.94	1.00	1.82

(3) 生态赤字(D_E)是指某区域的生态足迹与生物承载力的差值,公式如下:

$$D_E = E_C - E_F \quad (3)$$

$D_E > 0$ 表明生态盈余; $D_E < 0$, 则出现生态赤字。

2.3 健康评价标准

以人均生态足迹的赤字占人均生态足迹的比例来判断生态系统健康状况,将生态健康状态划分为病态、欠健康、亚健康、健康、非常健康 5 种状态(表 2)。

表 2 基于生态足迹的喀斯特高原山地生态系统健康评价标准

健康状态	病态	欠健康	亚健康	健康	很健康
评价标准 M	-1~-0.7	-0.7~-0.3	-0.3~0.3	0.3~0.7	0.7~1.0

注: M 为生态赤字占人均生态足迹的比率。

表 3 毕节试验区生物资源消费的生态足迹

生物资源类别	全球平均产量/(kg·hm ⁻²)	区域生物消费量/kg	人口	人均足迹/hm ²	生产面积类型	分类合计/hm ²
夏粮	2 744	668 000 000	7 596 600	0.032 0	耕地	—
稻谷	2 744	283 600 000	7 596 600	0.013 6	耕地	—
小麦	2 744	217 900 000	7 596 600	0.010 5	耕地	—
玉米	2 744	1 182 200 000	7 596 600	0.056 7	耕地	—
豆类	1 856	88 200 000	7 596 600	0.006 3	耕地	—
薯类	12 607	700 200 000	7 596 600	0.007 3	耕地	—
植物油	618	116 271 000	7 596 600	0.024 8	耕地	—
烟叶	1 548	91 502 000	7 596 600	0.007 8	耕地	—
蔬菜	18 000	1 128 653 000	7 596 600	0.008 3	耕地	0.167 3
水果	3 500	49 611 000	7 596 600	0.001 9	林地	—
茶叶	566	648 000	7 596 600	0.000 2	林地	—
木材	1.99 ^①	40 294 ^②	7 596 600	0.002 7	林地	0.004 8
猪肉	74	223 827 000	7 596 600	0.398 1	草地	—
牛羊肉	33	19 571 000	7 596 600	0.078 1	草地	—
禽蛋	400	23 409 000	7 596 600	0.007 7	草地	0.483 9
水产品	29	8 408 000	7 596 600	0.038 2	水域	0.038 2

注:①木材全球平均产量单位为 m³/(hm²·a); ②木材区域生物消费量单位为 m³。

(2) 能源消费的生态足迹需求。能源消费的生态足迹是指能源的生产所需要的生态空间以及能源消费

$$M = \frac{D_E}{E_F} \times 100\% \quad (4)$$

式中: M ——生态赤字占人均生态足迹比率; D_E ——人均生态赤字或盈余; E_F ——人均生态足迹。

3 以毕节试验区为例分析

3.1 资料来源

以下数据主要来源于《毕节地区统计年鉴》(2008)以及《贵州省统计年鉴》(2008),部分消费数据采用 2007,2008 和 2009 年平均数据。其中的全球平均产量数据来源于 Wackernagel 的文献。

3.2 生态足迹需求

根据生态足迹的概念和计算方法,毕节地区的生态足迹需求应该由生物资源消费的生态足迹、能源消费的生态足迹 2 大部分组成。

(1) 生物资源消费的生态足迹需求。生物资源的消费品主要包括夏粮、稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类、植物油、烟叶、蔬菜、水果、茶叶、木材、猪肉、牛羊肉、禽蛋以及水产品等生活消费品。毕节地区生物资源消费的生态足迹需求见表 3。

后吸收其所产生的二氧化碳所需要的生态空间。由于各种消耗的能源都折算为标准煤,所以油料、天然气、

电力都按标准煤计算。数据来源于 2008 年《毕节地区统计年鉴》。毕节地区能源消费的生态足迹需求见表 4。

3.3 毕节试验区生态足迹总需求及总供给汇总

毕节地区的生物资源消费、能源消费、废弃物消纳这 3 个主要部分的生态足迹需求,以及现有的耕地、林地、草地、水域是区域发展的本地生物生产空间,其数量和质量水平决定着区域能够提供的生态空间,根据统计资

料计算总的国际标准生态空间。再减去 12% 的生物多样性保护的面积就是区域能够为发展提供的总的生态空间。毕节地区区域发展的总的生态足迹需求与供给见表 5。

从表 5 可以看出全区域的人均生态足迹需求为 2.970 3 hm²,区域的人均生态足迹供给为 0.267 96 hm²。

表 4 毕节地区能源消费的生态足迹

能源种类	全球平均/ (GJ·hm ⁻²)	折算系数/ (GJ·t ⁻¹)	消费量	调整后 消费量/GJ	人均消费/ GJ	人均足迹/ hm ²	生态空间 类型
标准煤	55	20.934	40 444 494	846 665 037.396	111.450 0	2.026 0	化石燃料土地
天然气	93	38.975	2 047.64	79 806.769	0.010 5	0.000 1	化石燃料土地
油料	93	43.124	25 705.21	1 108 511.47 604	0.146 0	0.001 6	化石燃料土地
电力	1000	0.008 3	5 307 350 308	44 051 007.556 4	5.799 0	0.005 8	建筑用地

注:电力折算系数单位为 GJ/(kW·h); 电力消费量单位为(kW·h)。

表 5 毕节试验区生态足迹总需求

土地类型	生态足迹			土地类型	生态承载力			
	总面积 (hm ² /人)	均衡 因子	均衡面积 (hm ² /人)		总面积 (hm ² /人)	产量 因子	均衡 因子	均衡面积 (hm ² /人)
耕地	0.167 3	2.8	0.468 4	耕地	0.048 0	1.23	2.8	0.165 3
草地	0.483 9	0.5	0.241 9	林地	0.127 0	0.80	1.1	0.111 8
林地	0.004 8	1.1	0.005 3	草地	0.045 0	0.94	0.5	0.021 2
水域	0.038 2	0.2	0.007 6	水域	0.000 5	1.00	0.2	0.000 1
建筑用地	0.005 8	2.8	0.016 2	建筑用地	0.001 2	1.82	2.8	0.006 1
化石燃料	2.028 0	1.1	2.230 8	总供给面积				0.304 5
总生态足迹			2.970 3	生物多样性保护(12%)				0.036 5
				总生态承载力				0.267 9

3.4 毕节试验区生态健康评价

生态足迹需求与可用的生态空间对比,可以看出人类生产生活对自然的占用状态与自然提供的生态服务状况之间的相互关系,判断区域生态系统健康状况。在毕节地区,需求与供给的情况如表 6 所示。

表 6 毕节试验区人均生态足迹盈亏状况 hm²

生态足迹	可用的 生态空间	生态足迹 赤字	生态足迹赤字 (不考虑化石燃料)
人均值	人均值	人均赤字	人均赤字
2.970 3	0.267 9	-2.702 3	-0.471 5

从表 6 中可以看出,毕节地区人均生态赤字为 -2.607 8 hm²,毕节的生态系统处于支出大于供给的状态,生态赤字比较大,毕节地区的人均生态赤字与生态足迹比率为 -0.877 9,生态系统健康,面临的干扰和胁迫比较多,根据生态系统健康评价标准,处于病态状态。在不考虑化石燃料的情况下,人均生态赤字与生态足迹比率为 -0.158 7,处于亚健康状态。

3.5 毕节试验区分区评价

采用以上计算方法对毕节地区其它县市生态足迹需求与可用的生态空间进行计算对比,并依据确定的生态系统健康标准,判断毕节地区各区县的生态系统健康状态。毕节地区各县市生态足迹的需求与供给及生态系统健康状况如表 7 所示。

从表 7 看出,在考虑化石燃料情况下,毕节地区各县市中,金沙县的赤字最高,为 -4.731 2;其次是纳雍县、黔西县和毕节市为;-3.889 5,-3.605 8,-3.207 8威宁县和赫章县的较少,为 -2.205 9 和 -2.068 8。毕节地区各县市中金沙县、纳雍县、黔西县和毕节市为生态系统提供服务较多的县市,其需求已经远远超过了供给,生态系统健康面临较大威胁,实施生态系统健康维护和保育的要求最为迫切。毕节地区金沙县、纳雍县、黔西县和毕节市也是这一地区人口密度最大,人地矛盾最突出和化石燃料开采和使用最多的地区,计算结果与实际十分吻合,相互印证。

依据生态系统健康的判断标准(表 2),对毕节地区

各县市生态系统健康进行判断,考虑化石燃料后,生态系统健康全部为病态;不考虑化石燃料的情况下,除了大方县和织金县是欠健康外,其它的县市处于亚健康状态。

3.6 毕节试验区生态系统健康的空间格局

对毕节地区各县市生态系统健康状况的研究表明,毕节地区西北部的高原山地地区经济落后,也属于石漠化程度较轻的地区,生态破坏程度相对于东部和中部山地区来说要小,所以西北部的威宁和赫章 2 县,生态系统虽然处于亏损状态,生态系统健康处于病态状态,但人均生态足迹赤字占人均生态足迹的比值较小,相对来说较好。

毕节地区的生态系统健康状况由西北向北部、南部和东部地区逐渐变差,尤其是在毕节市和纳雍县境内,生态系统处于极度病态状态,生态系统的需求远远大于供给。主要原因是这 2 个地区人口密度相对其它地区要大,尤其是纳雍县又是贵州省的土法炼芯

和土法炼焦以及重要的产煤区,化石燃料的输出与消费较大,导致在考虑化石燃料的时候,这 2 个地区生态系统健康处于极度亏损状态。

在不考虑化石燃料消耗对生态系统健康产生的后果的前提下,毕节试验区及所属 8 个县市均为亚健康状态和欠健康状态。若进行细化,则毕节市、赫章县人均生态足迹赤字占人均生态足迹的比值小于 -0.20 ,为生态系统健康状态相对较好一级。纳雍、黔西、金沙、威宁等 4 个县的比值在 $-0.20 \sim -0.30$ 之间,为中间档次。大方县和织金县生态系统健康受危害最大,比值超过 -0.30 ,这是因为 2 个县是毕节地区人口和经济发展相对较好的地区,人类活动对喀斯特生态系统的干扰强度较大。同时这与毕节地区喀斯特出露面积分布中间多(大方县占 81.54% ,织金县占 78.39%),四周相对较少相对应,生态系统健康状态的空间变化也大致从中心向四周方向变差(见附图 11)。

表 7 毕节试验区各县市生态足迹平衡及健康状况

县市 区名	人均生态 足迹/hm ²	人均可用的 生态空间/ hm ²	人均生态足迹赤字		人均生态足迹赤字占 人均生态足迹的比值 M		健康状态	
			考虑 化石燃料	不考虑 化石燃料	考虑 化石燃料	不考虑 化石燃料	考虑 化石燃料	不考虑 化石燃料
毕节市	3.513 8	0.286 1	-3.227 8	-0.516 1	-0.919 0	-0.146 8	病态	亚健康
大方县	3.147 2	0.382 8	-2.764 5	-0.970 8	-0.878 0	-0.308 4	病态	欠健康
黔西县	3.903 2	0.297 4	-3.605 8	-0.887 6	-0.924 0	-0.227 4	病态	亚健康
金沙县	5.111 2	0.380 0	-4.731 2	-1.089 9	-0.926 0	-0.213 2	病态	亚健康
织金县	3.056 5	0.374 4	-2.682 1	-1.050 5	-0.876 0	-0.343 7	病态	欠健康
纳雍县	4.131 1	0.241 7	-3.889 5	-1.158 1	-0.942 0	-0.228 0	病态	亚健康
威宁县	2.635 6	0.429 7	-2.205 9	-0.727 6	-0.837 0	-0.276 6	病态	亚健康
赫章县	2.625 7	0.556 9	-2.068 8	-0.469 9	-0.788 0	-0.178 9	病态	亚健康

4 结论

在考虑化石燃料的情况下,毕节地区生态系统健康处于病态,毕节地区的其它县市生态系统也都处于病态状态;在不考虑化石燃料的情况下,毕节地区和大部分县市处于亚健康状态。化石燃料的使用,对喀斯特高原山地生态系统影响很大,大量开采和使用化石燃料对脆弱喀斯特生态系统的影响将是致命的。除了化石燃料外,经济发展状况、人口密度大小及喀斯特出露面积(人地矛盾)对毕节地区喀斯特高原山地生态系统影响也较大。

毕节地区的生态系统健康状况由西北向北部、南部和东部地区逐渐变差,尤其是在毕节市和纳雍县境内,生态系统处于极度病态状态,生态系统的需求远

远大于供给。在不考虑化石燃料的情况下,在空间格局上,毕节地区的中部(大方县和织金县)生态系统处于病态状态,其周围都属于亚健康状态,这与毕节地区喀斯特出露面积分布中间多,四周较少的状况相对应,生态系统健康状态的空间变化也大致从中心向四周方向变差。

本文基于生态足迹方法研究了喀斯特高原山地生态系统的健康问题,在生态系统健康评价研究对象和区域选择上作了探索、丰富和细化。但由于时间和数据收集的困难,本文对喀斯特高原生态健康的评价只采用了 1 a 的数据资料,虽然在客观上反映了喀斯特高原地区的生态健康状况,但没有体现出喀斯特高原地区生态系统健康的年际动态变化特征,下一步如果条件允许,应该搜集多期数据,对喀斯特高原地区

生态系统健康的动态变化作更深入细致地研究,以便揭示出喀斯特高原地区生态系统演替特征。

依据生态赤字占人均生态足迹比率,建立基于生态足迹的喀斯特高原山地生态系统健康评价标准,对喀斯特地区生态系统健康评价具有借鉴和参考价值。建议在喀斯特地区应大力提倡低碳经济发展模式,加强喀斯特高原山地地区石漠化治理和植被的恢复,使喀斯特生态系统健康状况由亚健康状态和欠健康状态向健康状态的良性循环转化。

西部喀斯特地区是国家退耕还林还草和石漠化治理的重点区域,如何保证退耕还林还草和石漠化治理的成功,加强生态补偿机制的完善和实施,切实保护好喀斯特高原山地生态系统的健康,将是政府和环保部门应密切关注的问题。

喀斯特高原山地地区是我们国家经济发展落后的地区,人地矛盾突出,如何处理好发展经济与生态环境保护问题,将是今后喀斯特高原地区生态系统管理的重要研究方向。

[参 考 文 献]

- [1] 赵旭阳,高占国,韩晨霞. 基于生态复杂性的湿地生态系统健康评价[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 61-68.
- [2] 张晓琴,石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 35-40.
- [3] 官冬杰,苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1716-1721.
- [4] 刘国彬,胡维银,许明祥. 黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 44-49.
- [5] 张宏锋,李卫红,陈亚鹏. 生态系统健康评价研究方法与发展[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 530-535.
- [6] 邢清枝,任志远,王丽霞. 基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 793-798.
- [7] 薛乃川,安尼瓦尔·阿木提,贡璐. 新疆近十年生态足迹与生态承载力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6): 24-28.
- [8] Wackernagel M, Yount J D. Footprint for sustainability: the next step[J]. Environment, Development and Sustainability, 2002(2): 21-42.

(上接第 108 页)

- [12] Thompson K. Predicating the fate of temperate species response to human disturbance and global change[M] // Boyle T J B, Boyle C E B eds. Biodiversity Temperate Ecosystems, and Global Change. Heidelberg: Springer-Verlag, 1994: 61-76.
- [13] Spellerberg I F, Sawyer J W D. Standards for biodiversity: A proposal based on biodiversity standards for fore plantations [J]. Biodiversity and Conservation, 1996, 5: 447-459.
- [14] 胡相明,程积民,万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本植物的结构特征[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 41-45.
- [15] 陈海滨,刘淑明,党坤良,等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究: 土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 5-8.
- [16] 王孟本. 晋西北黄土区不同人工林生物生产力的研究[J]. 植物学报, 1994, 36(S): 237-240.
- [17] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [18] 卜耀军,温仲明,焦峰,等. 黄土丘陵区人工与自然植物群落物种多样性研究: 以安塞县为例[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 4-6.

(上接第 140 页)

- [3] 邵明安,杨文治,李玉山. 植物根系吸收土壤水分的数学模型[J]. 土壤学报, 1987, 24(4): 295-304.
- [4] 罗毅,于强,欧阳竹,等. 利用精确的田间实验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报, 2000, 32(4): 73-80.
- [5] 姚立明,康绍忠,龚道枝,等. 苹果树根系吸水模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 67-70.
- [6] 虎胆·吐马尔白. 作物根系吸水率模型的试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(4): 15-18.
- [7] 张立楨,曹卫星,张思平,等. 棉花根系生长和空间分布特征[J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 266-273.
- [8] 阳园燕,郭安红,安顺清,等. 土壤-植物-大气连续体系统中植物根系吸水模型研究进展[J]. 气象科学, 2004, 32(5): 316-321.
- [9] Landsberg J J, McMurtrie R. Water by isolated trees [J]. Agric. Water Manage., 1984(8): 223-242.
- [10] 姚建文. 作物生长条件下土壤含水量预测的数学模型[J]. 水利学报, 1989, 30(9): 32-38.
- [11] 朱李英,孙西欢,马娟娟. 棉花根系吸水模型试验研究[J]. 山西水利, 2009, 45(3): 45-47.