

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

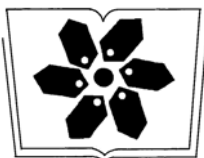
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第3期 Vol.34 No.3 **2014**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 3 期 2014 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 灾后生态恢复评价研究进展 刘孝富,王文杰,李京,等 (527)
- 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析 庞明月,张力小,王长波 (537)

个体与基础生态

- 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力 马璐,曹文清,张文静,等 (546)
- 鲢鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力 樊晓丽,林植华,丁先龙,等 (555)
- 环境温度对白头鹇代谢产热和蒸发失水的影响 林琳,曹梦婷,胡益林,等 (564)
- 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响 黄彩变,曾凡江,雷加强,等 (572)
- PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响 朱凡,洪湘琦,闫文德,等 (581)
- 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇 (589)
- 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等 (597)

种群、群落和生态系统

- 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性 高福元,赵成章,卓马兰草 (605)
- 捕食者对空心莲子草叶甲种群的生物胁迫 刘雨芳,李菲,桂芳艳,等 (613)
- 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 马威,孙军 (621)
- 磨盘山天然次生林凋落物数量及动态 范春楠,郭忠玲,郑金萍,等 (633)
- 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响 刘方春,邢尚军,马海林,等 (642)
- 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例 张雷,王琳琳,张旭东,等 (650)
- 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究 侯鹏,申文明,王桥,等 (660)
- 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子 黄辉,孟平,张劲松,等 (667)
- 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的 CO_2 , CH_4 和 N_2O 通量特征 贺桂香,李凯辉,宋韦,等 (674)

景观、区域和全球生态

- 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 马明德,马学娟,谢应忠,等 (682)
- 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率 董林林,杨浩,于东升,等 (690)
- 自养微生物同化 CO_2 的分子生态研究及同化碳在土壤中的转化 吴小红,简燕,陈晓娟,等 (701)

资源与产业生态

- 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 孙玉峰,郭全营 (710)

基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估——以舟山海岸带为例 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等 (718)

城乡与社会生态

基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 李春林,刘 淼,胡远满,等 (727)

研究简报

陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异 梁 婷,同延安,林 文,等 (738)

不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响 刘小勇,李红旭,李建明,等 (746)

长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性..... 王振海,殷秀琴,蒋云峰 (755)

最大可允许填海面积模拟——厦门西海域案例研究 林琛琛,饶欢欢,刘 岩,等 (766)

学术信息与动态

2013 年水文土壤学与自然资源可持续利用国际学术研讨会述评 张 骁,赵文武 (774)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 252 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 29 * 2014-02



封面图说：云南松树冠——云南松为松科松属裸子植物，多生长在海拔 1000—3500m 的高山，喜光、耐干旱、耐瘠薄，适应酸性的红壤、黄壤，在其他树种不能生长的贫瘠石砾地或冲刷严重的荒山坡分布，易于天然更新。主要分布于四川西南部、云南、西藏东南部、贵州西部、广西西部，常形成大面积纯林，尤以云南分布最广，故有云南松之称。云南松树高可达 30m，胸径达 1m，树皮呈灰褐色，叶通常 3 针一束，鲜有两针，球果圆锥状卵圆形，种子近卵圆形或倒卵形。树干通直，木质轻软细密，是优质造纸、人造板原料，富含松脂是云南松的重要特点之一。

彩图及图说提供：陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210301504

魏兴萍, 蒲俊兵, 赵纯勇. 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价. 生态学报, 2014, 34(3): 589-596.

Wei X P, Pu J B, Zhao C Y. Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 589-596.

基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区 地下水脆弱性评价

魏兴萍^{1,2}, 蒲俊兵^{2,*}, 赵纯勇¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, GIS 应用研究重庆市重点实验室, 重庆 400047;

2. 国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 联合国教科文组织国际岩溶中心,
中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要: 岩溶地下水脆弱性评价是保护、管理和利用岩溶地下水的基础与有效方法。我国西南岩溶区绝大多数地区由于缺少应有的地下水保护带, 地下水比较容易受污染。运用修正的 RISKE 模型, 对重庆岩溶地区地下水进行脆弱性评价。结果表明: 岩溶在 4 个地区所占面积从高到低依次为渝东北 (43.14%)、渝东南 (42.82%)、渝东 (9.82%)、渝西地区 (4.22%)。重庆岩溶地区地下水脆弱性中度以上, 面积比例由高到低依次为渝东南 (33.29%)、渝东北 (29.21%)、渝东 (6.68%)、渝西地区 (2.37%)。地下水水质检测由差到好依次为渝东南、渝东北、渝西和渝东地区。地下水脆弱性在空间分布上的特征不仅显示了岩性、土壤、落水洞、岩溶裂隙等自然特征对其脆弱性的影响, 同时也反映了人类活动对地下水的影响。因此在自然条件无法改变的情况下, 控制人类活动对地下水的污染就显得尤为重要。

关键词: RISKE 模型; 重庆岩溶地区; 地下水; 脆弱性评价

Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model

WEI Xingping¹, PU Junbing^{2,*}, ZHAO Chunyong¹

1 College of Geography and Tourism, Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

2 Key Laboratory of Karst Dynamics (Ministry of Land and Resources/Guangxi Zhuang Autonomous Region), International Research Center on Karst Under the Auspices of UNESCO, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

Abstract: Assessment of karst groundwater vulnerability provides an efficient means for protection, management and utilization of karst groundwater resources. Groundwater tends to be polluted due to the lack of protection zoning in place over most karst area in southwest China. This paper reviews and adapts the RISKE model for a use in assessing the karst groundwater vulnerability in Chongqing. It is concluded that the distribution of karst areas in a decreasing order is identified as the Northeast (43.14%), the Southeast (42.82%), the east (9.82%) and the west of Chongqing (4.22%), while the areas exceeding the medium vulnerability threshold are the Southeast (33.29%), the Northeast (29.21%), the east (6.68%) and the west (2.37%) in Chongqing. In terms of the groundwater quality, ranks from the worst to the best are the Southeast, the Northeast, the west and the east of Chongqing, respectively. It is further concluded that the spatial characteristics of the groundwater vulnerability in the areas is affected not only by the natural characteristics such as lithology, soil, sinkholes, karst fissure etc., but also by human activities. It is realistic that the control of human activities

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC2012jjA80008); 国家自然科学基金资助项目 (41202135); 国土资源部岩溶动力学重点实验室开放课题资助项目 (KDL2011-08); 校级 GIS 重点实验室开放课题资助项目

收稿日期: 2012-10-30; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: junbingpu@karst.ac.cn

should be prioritized in order to mitigate groundwater pollution.

Key Words: RISKE model; karst region of Chongqing; groundwater; vulnerability assessment

岩溶地下水是岩溶地区重要的水资源,世界上约 25% 的人需要从岩溶地下水中获得水源^[1]。由于特殊的岩溶结构,地表和含水层通过表层岩溶、落水洞等方式紧密联系,使得岩溶含水层很容易受到污染^[2-3]。为有效防治地下水环境问题,“地下水脆弱性”这一术语在 1968 年由 Margat 首次提出^[5]。在 20 世纪 80 年代以来,地下水脆弱性研究成为国际水文地质研究的热点问题^[6-8]。地下水脆弱性评价方法很多,如 GOD 和 DRASTIC。DRASTIC 指标方法在加拿大、欧共体、美国及南非得到了广泛的应用^[9]。1998 年 Doerfliger 等^[5]首先提出了适合于岩溶地下水的评价方法 EPIK 法。2003 年欧盟科学技术委员会,提出了一种适合于岩溶地下水评价的欧洲模式,各国在欧洲模式评价理念的基础上,提出了适合本国的评价方法^[10-13]。国内主要采用二元法、COP、EPIK、欧洲模型等方法对岩溶地下河脆弱性进行评价^[3,6,15-19]。DRASTIC 法较通用,但没有考虑含水层类型,包气带介质考虑也不全面,实际工作中有些因子很难获得;Legerand 使用范围较小;GOD 模型较简单,没有考虑盖层岩性的复杂性和各种岩性的厚度;AVI 模型简单快捷;COP、EPIK、RISKE 等方法考虑了自然因素对地下河的影响,没有考虑人类因素对地下河的影响。重庆岩溶地下水脆弱性的评价仅限于局部的、某一条地下河流域的研究^[6,16,19]。重庆岩溶地区地下水缺乏脆弱性整体评价。重庆地下水资源丰富,其中岩溶水资源占地下水资源量的 73.65%^[4]。2006 年重庆遭遇百年不遇的特大旱情,受灾人口约 2100 万人,2009 年秋冬以及 2010 年春再次遭遇百年一遇的特大旱灾。弄清楚整个重庆岩溶地区受自然、人类影响的区域演化规律,对于缓解近几年频繁出现的旱情迫在眉睫。正确地评价岩溶地下河脆弱性,为重庆市政府和当地人民采用地下河提供理论依据。根据已有的数据以及能够获取的数据,本文选择 RISKE 模型,添加人类因素,修正 RISEK 模型,对重庆岩溶地区地下水脆弱性进行综合评价。

1 研究区概况

重庆市地跨东经 105°17′—110°11′,北纬 28°10′—32°13′之间,幅员面积 8.24 万 km²,其中碳酸盐岩出露面积(含碳酸盐岩夹碎屑岩)达 3.0 多万 km²,占全市总面积的 36.49%,主要分布在渝东北的大巴山地区,渝东南以及中西平行岭谷背斜轴部,主要出露地层有寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系的碳酸盐岩^[4]。重庆市岩溶地下水与碳酸盐岩面积分布基本一致,其主要分布在三叠系地层,因为重庆三叠系地层分布面积最广(面积 1.73km²),其次是分布在二叠系和奥陶系。寒武系地下水分布少的原因是寒武系以白云岩地层为主,其溶蚀作用没有石灰岩强烈。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源和检测方法

本文所需数据包括重庆地区的 1:10 万土壤类型图、1:5 万地形图、1:20 万重庆市水文地质图、2008 年 1:10 万土地利用图以及 1:20 万水文地质报告。此外,选择本研究区内 70 条地下河出口作为采样点,于 2009 年 7—9 月(雨季)进行,有少部分样品采用 2007 年、2008 年调查时的数据,样品数达 70 个。对样品进行 Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 水质分析,水质数据作为研究区地下水脆弱性评价的验证资料。Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 测试方法参考《地下水标准检验方法》(地质实验室,1988-04)进行。其中 Cl⁻采用 AgNO₃滴定法测试,NO₃⁻、SO₄²⁻采用日本岛津公司产 UV2450 紫外分光光度计测定。样品测试在西南大学岩溶环境学实验室完成。

2.2 研究方法

岩溶地区地下水脆弱性评价的方法,在国际上有好几种,这里选择 RISKE 模型的原因是因为该模型考虑的因素比较全面,而且这些参数都能够获取。由于地下水的脆弱性是自然和人类原因导致,因此还叠加了人类因素 Lu,对 RISKE 模型进行修正。其中 R 为含水层岩石;I 为渗透条件;S 为土壤;K 为岩溶发育程度;E 为表层岩溶;Lu 为土地利用类型,这

样评价的结果更有参考价值。

2.2.1 含水层岩石因子脆弱性评价方法

根据碳酸盐岩地区岩石的平均渗入系数进行评价,纯碳酸盐岩类型的岩石渗透率为 0.36,少夹层碳酸盐岩类型的岩石渗透率为 0.3,多夹层泥灰岩、白

云岩类型为 0.25,碎屑岩泥、页岩为 0.1,志留系泥、页岩为 0.1^①。根据 1:20 万水文地质图进行岩层矢量化,将重庆各图幅进行拼接,得到重庆市岩层分布图,再按照表 1 进行脆弱性分级。

表 1 脆弱性评价标准

Table 1 The vulnerability evaluation standard

脆弱性分级 Vulnerability rates	岩石单元 lithology units	坡度分级/% Slope rates	土壤类型 Soil type
0 无脆弱性 Invulnerability		>50	
1 低脆弱性 Low vulnerability	页岩、泥岩、砂岩	15—50	水稻土
2 中脆弱性 Moderate vulnerability	碳酸盐岩夹碎屑岩	5—15	新积土、山地草甸
3 高脆弱性 Strong vulnerability	白云岩、石灰岩	0—5	棕壤、黄褐土、石灰土、新积土
4 极脆弱性 Extreme vulnerability			黄壤、黄棕壤、粗骨土、紫色土
脆弱性分级 Vulnerability rates	岩溶发育程度 Karst development degree	表层岩溶特征 Epikarst characteristics	土地利用类型 Landuse types
0 无脆弱性 Invulnerability	无岩溶发育	没有岩溶地貌地区	
1 低脆弱性 Low vulnerability	岩溶不发育	岩溶地貌不明显地区	林、灌、草地
2 中脆弱性 Moderate vulnerability	岩溶较发育	溶沟田、干谷	耕地、低密度居民地
3 高脆弱性 Strong vulnerability	岩溶发育	落水洞、溶沟	耕地、中密度居民地
4 极脆弱性 Extreme vulnerability	岩溶很发育	竖井、溶洞	高密度居民地以及工业区

2.2.2 坡度渗透因子脆弱性评价方法

2.2.3 土壤渗透因子评价方法

土壤渗透因子,可以借用水土流失方程中的可蚀性 K 因子。 K 因子的计算可以参考已有的相关研究成果^[22]以及美国通用方程公式中关于 K 因子的计算方法来结合分级。

为了得到坡度的渗漏情况,利用重庆市 1:5 万 DEM 图,通过坡度分析,一般来说,坡度越陡,地表越容易产生径流,渗漏量越低,相反,坡度越缓,地表水更容易渗漏。根据此原理,按照表 2^[13]的方法进行分级。

2.2.4 岩溶发育程度分级评价方法

地表岩溶地图可以利用 1:20 万重庆市水文地质图、遥感图和野外考察,根据表 1 标准得出。

2.2.5 地表岩溶地貌分级评价方法

表层岩溶地貌分级通过利用 1:20 万水文地质图、1:5 万的地形图、DEM 图、遥感图像以及野外考察综合分析,按照表 1 分级^[13]得出。

2.2.6 土地利用分级评价方法

人类活动可能会加剧或者减弱地下水脆弱性,因此在 RISKE 模型中,考虑了人类活动因子对地下水的影响。根据人类活动的强度,对不同的土地利用类型按照 P.E. van Beynen^[8]进行分级,其结果见表 1。

2.2.7 岩溶地区地下水脆弱性评价

根据上面的评价方法,得到各因子的脆弱性评价,但是其仅反映某一个因子的脆弱性,而没有将研究区的地下水脆弱性空间变异特征综合反应出来。运用 ArcGIS 的空间分析功能,将上述各因子要素图

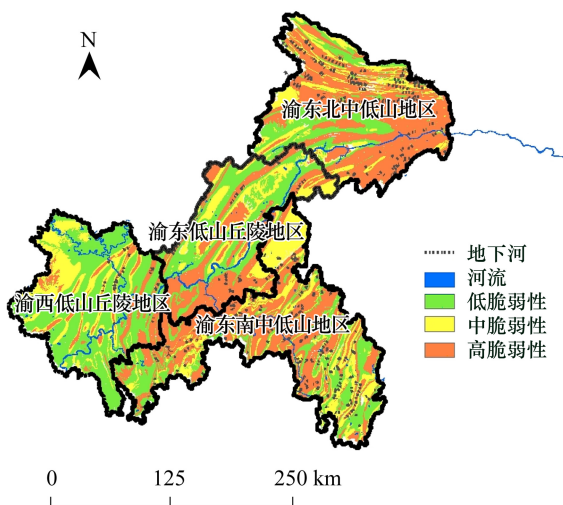


图 1 岩性分级图

Fig.1 The map of Lithology rates

①区域水文地质普查报告——巫溪幅 81 页

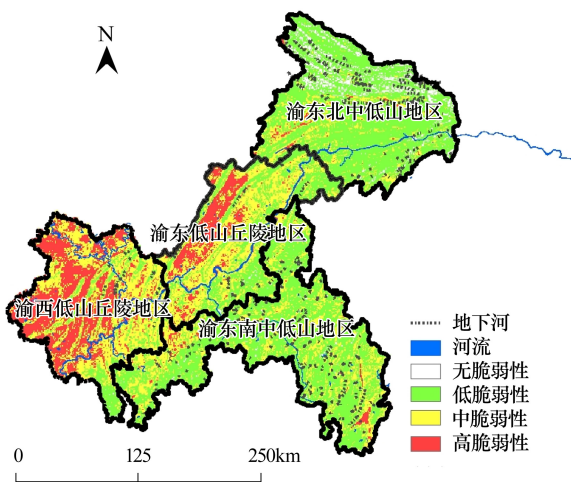


图 2 渗漏图
Fig.2 The map of the infiltration

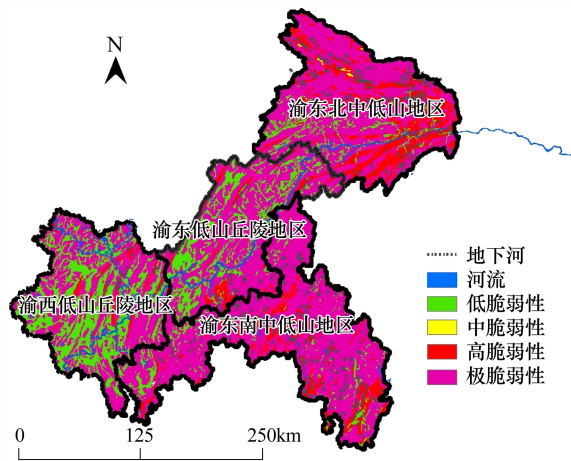


图 3 土壤分级图
Fig.3 Soil rate map

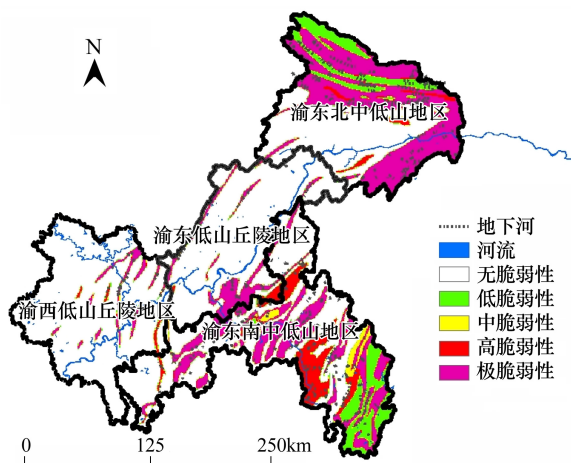


图 4 岩溶发育程度分级地图
Fig.4 The map of Karst development degree rates

层按照公式 1 进行叠加,得到重庆岩溶地区地下水脆弱性评价。

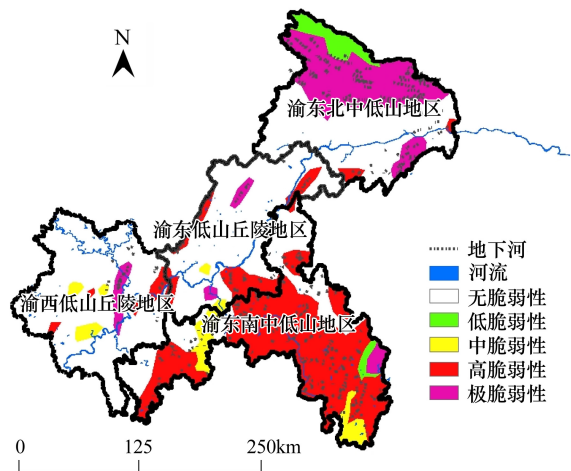


图 5 表層岩溶分级图
Fig.5 The map of Epikarst rates

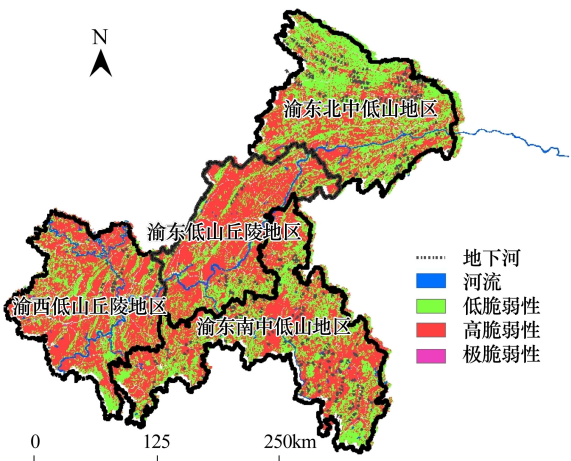


图 6 土地利用类型分级图
Fig.6 The landuse type rate map

$$F=\alpha Ri+\beta Ij+\delta Sk+\gamma Kl+\varepsilon Em+\zeta Lu \quad (1)$$

通过添加人类活动因子,根据 B.Kattaa^[13] 的权重设置,结合重庆实际情况以及专家建议,得 $F=0.1R+0.1I+0.1S+0.2K+0.2E+0.3Lu$,运用 ARCGIS 的栅格空间叠加分析,得到重庆岩溶地区地下水脆弱性评价。再根据自然断点法,将地下水脆弱性评价分为 5 级。为了得到岩溶地区地下水脆弱性空间分布特征,将非岩溶地区的部分剪切即可,见图 7。

3 结果分析

3.1 含水层岩石因子脆弱性评价

岩性是确定地下水分布的关键因子,同时也是

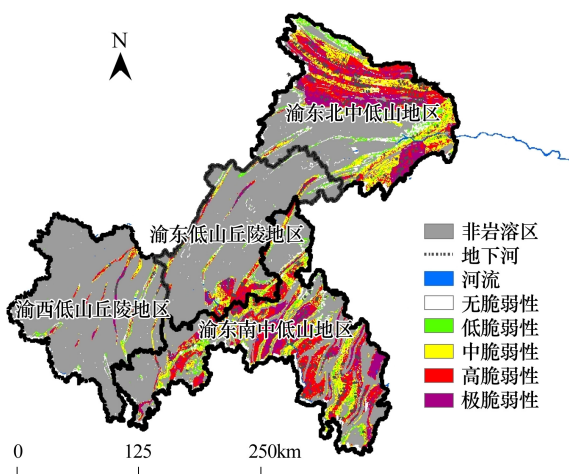


图 7 岩溶地区地下水脆弱性图

Fig.7 The underground water vulnerability map in karst region

导致地下水脆弱性的根本自然因素。根据岩性因素导致的地下水脆弱性面积分布,高脆弱性面积占 3.58 万 km^2 ,比例占 43.45%。从图 1 中可以看出,其主要分布面积依次为渝东北中低山地区、渝东南中低山地区、渝东低山丘陵区以及渝西低山丘陵区。

3.2 山坡渗漏因子评价

根据坡度是决定地表径流参数的一个重要因素,越陡的坡度越容易产生地表径流,其对地下水的影响越小。在重庆地区山坡渗漏无脆弱性面积占了 13.77%,低脆弱性占了 51.79%。他们主要分布在渝东北和渝东南中低山地区。而在渝东、渝西低山丘陵地区由于存在较多的谷地、平坝,导致脆弱性较大,其中中高脆弱性面积达 28375.16 km^2 ,比例占到 34.44%。

表 2 岩石脆弱性评价表

Table 2 The vulnerability assessment table on the rock

分级 Rates	低脆弱性 Low vulnerability	中脆弱性 Moderate vulnerability	高脆弱性 Strong vulnerability
面积 Areas/ Km^2	28589.68	18007.63	35802.69
百分比 Proportion/%	34.70	21.85	43.45

表 3 山坡渗漏脆弱性评价表

Table 3 The vulnerability assessment table on the slope infiltration

分级 Rates	无脆弱性 Invulnerability	低脆弱性 Low vulnerability	中脆弱性 Moderate vulnerability	高脆弱性 Strong vulnerability
面积 Areas/ km^2	11347.12	42677.72	18693.94	9681.22
百分比 Proportion/%	13.77	51.79	22.69	11.75

3.3 土壤渗透因子评价

研究区土壤渗透因子以高脆弱性和极脆弱性为主,分别占到整个研究区面积的 12.48%和 69.28%。主要分布在渝东北和渝东南中低山地区。这些地区土壤脆弱性强的主要原因是岩溶发育,土层薄,再加上三峡地区消落区淹没,农民趋向陡坡耕作,使得脆弱性高。

3.4 岩溶发育程度以及地表岩溶发育程度脆弱性评价

岩溶的发育程度与地表岩溶发育程度均受岩性控制,重庆碳酸盐岩地区主要发育在三叠系、二叠系、奥陶系以及寒武系岩层,因此可以看出无论是岩溶发育脆弱性评价还是地表岩溶脆弱性评价其脆弱性面积比例占整个研究区面积的 1/3,均主要分布在渝东北和渝东南中低山区。

表 4 土壤渗透脆弱性评价表

Table 4 The vulnerability assessment table on the soil infiltration

分级 Rates	低脆弱性 Low vulnerability	中脆弱性 Moderate vulnerability	高脆弱性 Strong vulnerability	极脆弱性 Extreme vulnerability
面积 Areas/ km^2	14935.86	93.16	10285.60	57085.39
百分比 Proportion/%	18.13	0.11	12.48	69.28

表 5 岩溶发育程度表

Table 5 The vulnerability assessment table on the karst development degree

分级 Rates	无脆弱性 Invulnerability	低脆弱性 Low vulnerability	中脆弱性 Moderate vulnerability	高脆弱性 Strong vulnerability	极脆弱性 Extreme vulnerability
面积/km ²	54211.73	5188.62	694.69	3728.43	18576.53
百分比 Proportion/%	65.79	6.30	0.84	4.52	22.54

表 6 地表岩溶发育程度表

Table 6 The vulnerability assessment table on the epikarst development

分级 Rates	无脆弱性 Invulnerability	低脆弱性 Low vulnerability	中脆弱性 Moderate vulnerability	高脆弱性 Strong vulnerability	极脆弱性 Extreme vulnerability
面积/km ²	48221.00	2056.59	2839.47	19092.89	10190.05
百分比 Proportion/%	58.52	2.50	3.45	23.17	12.37

3.5 土地利用对地下水脆弱性评价

地下水中主要的污染来自工业、农业和城镇的生活污水,因此土地利用类型对地下水的污染评价

是不可忽略的。根据表 7,可以看出研究区高度脆弱性以上等级的比例占了 57.45%,根据人口的居住密度,其主要分布在渝西、渝东地区,再次是渝东南和渝东北地区。

表 7 土地利用脆弱性评价表

Table 7 The vulnerability assessment table on the landuse

分级 Rates	低脆弱性 Low vulnerability	中脆弱性 Moderate vulnerability	高脆弱性 Strong vulnerability	极脆弱性 Extreme vulnerability
面积/km ²	11903.32	23156.22	47023.55	316.91
百分比 Proportion/%	14.45	28.10	57.07	0.38

3.6 重庆岩溶地区地下水脆弱性评价

岩溶在四个地区所占面积从高到低依次为渝东北、渝东南、渝东、渝西地区。通过叠加分析,重庆地下水脆弱性主要表现在渝东南和渝东北,其次渝东、渝西地区。地下水脆弱性表现出中度及以上脆弱性,其比例为 67.85%,其中渝东南(比例 33.29%),渝东北(比例 29.21%),渝东地区(比例 6.68%),渝西地区(比例 2.37%),因此可见渝东南和渝东北是最脆弱的,其次是渝东以及渝西地区。从岩性来看,渝东南和渝东北均是三叠系、寒武系、奥陶系以及二叠系发育碳酸盐岩,渝东南岩溶面积比例没有渝东北高,但是地下水脆弱性高于渝东北,原因是渝东南人口密度更高,该地区农业、工矿、城市发展等人类活动对地下水影响更强。渝西岩溶面积比例和脆弱性均低于渝东地区。2010 年 6—8 月对重庆岩溶地区 70 条地下河出口取样,检测水中阴离子(NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})浓度,根据地下水质量标准,对水质分别进行质量分类,再叠加分析,得出,这 4 个地区水质情况由差到好依次是:渝东南、渝东北、渝西、渝东

(图 8)^[4],前文分析的大致一致,但还是有所出入,渝东的地下水脆弱性强于渝西,一是因为渝东地区岩溶面积均为三叠系岩层,石灰岩比例含量高,岩溶裂隙更为发育,而渝西地区除了三叠系岩层之外,还有寒武系和奥陶系岩层,它们主要岩性是白云岩,裂

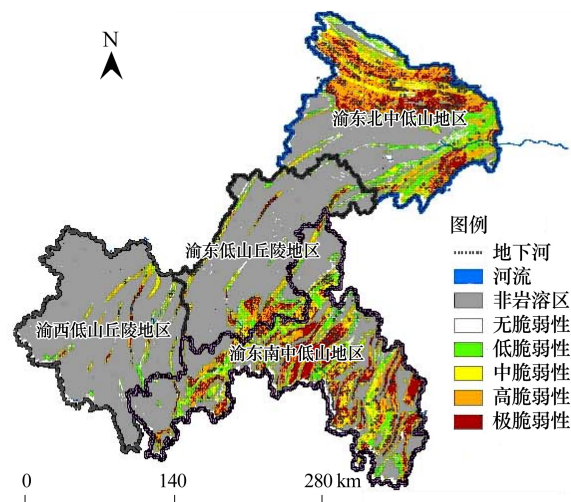


图 8 岩溶地下水污染图(雨季)

Fig.8 The groundwater pollution map in karst region

隙发育程度不及石灰岩岩层。二是因为渝西地区人口密度高于渝东地区,人类活动强于渝东地区。渝西地区大多是岩溶槽谷区,槽谷区是人们进行农业活动、居住以及采矿的区域,对其地下水影响大于渝东地区。这也证明了岩溶地区地下水脆弱性评价必

须考虑人类活动对其的影响。为了更好地防治岩溶地区地下水污染,首先应该截断人类的污染源。本研究地下水脆弱性在空间分布上的特征不仅显示了岩性、土壤、落水洞、岩溶裂隙等自然特征对其脆弱性的影响,同时也反映了人类活动对地下水的影响。

表 8 岩溶地区脆弱性评价表
Table 8 The vulnerability assessment table on the karst region

	地区 Region							
	渝东北		渝东南		渝东		渝西	
	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion
无脆弱性 Invulnerability	1086.05	3.53	502.83	1.63	336.66	1.09	230.03	0.75
低脆弱性 Low vulnerability	2205.83	7.17	2294.45	7.45	675.21	2.19	339.84	1.10
中脆弱性 Moderate vulnerability	2070.85	6.73	2226.87	7.23	401.55	1.30	240.15	0.78
高脆弱性 Strong vulnerability	5542.23	18.00	4123.19	13.39	1085.37	3.53	337.17	1.10
极脆弱性 Extreme vulnerability	2465.3	8.01	3896.84	12.66	570.77	1.85	153.58	0.50
合计 Total	13370.26	39.90	13044.18	42.37	3069.56	9.97	1300.77	4.23

4 结论与讨论

岩溶地下水脆弱性的影响因素不仅与自然因素有关,人类活动的影响也不容忽视。因此,在进行重庆岩溶地区地下水脆弱性评价时,其指标除选用 RISKE 模型中的岩性、坡度、土壤、岩溶发育程度、地表岩溶特征之外,还特别考虑了人类活动的影响,构建了修正的 RISKE 模型。

通过综合评价,地下水脆弱性能够在一定程度上很好地反应地下水脆弱性布局。重庆岩溶地区地下水脆弱性空间分布的强弱依次是渝东南、渝东北、渝东以及渝西。通过水质检测,地下水污染程度依次是渝东南、渝东北、渝西以及渝东地区。研究中发现岩溶裂隙发育程度越高,坡度越缓,人类活动对其影响越强,地下水表现越脆弱。在研究中,岩溶地区岩性组合复杂,裂隙发育程度只能通过遥感图片、地形图、水文地质图等进行分析判断,难免出现不准确的地方。通过本研究与实际的水质污染情况对比,评价结果基本符合实际情况,这说明本文提出的模型具有很好的实用性。这也进一步证实了,在进行地下水脆弱性评价时,需要考虑人类活动因素的影响。

在理解了地下水脆弱性影响因素以后,我们虽然无法改变自然因素对地下水的影响,但我们可以加强水文地质基础调查研究工作,为正确评价地下水脆弱性提供依据。可以改善人类因素对地下水脆弱性的影响。在人类影响地下水水质的因素中,有城镇生活污水、工矿活动对地下水的影响、农业活动以及生活垃圾对地下水的影响。因此要缓解地下水水质,需要调整土地利用方式,突出生态优先原则;还可以加强对当地人民的科普教育,尤其是领导干部对岩溶地下水污染的科普学习,理解其危害性,督促当地人民保护地下水,尽可能地减少对当地地下水的污染。

致谢:数据库的建立和野外数据采样得到周超、汪智军、曹敏、毛海红、翟心心等帮助,特此致谢。

References:

[1] Trimble S W. Encyclopedia of Water Science. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2008.

[2] Ravbar N, Goldscheider N. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. Hydrogeology Journal, 2009, 17(3): 725-733.

[3] Peng W, Pei J G. Study on vulnerability assessment of karst aquifer. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 9-15.

- [4] Pu J B. Research on the Controlling Factors of Formation and Distribution of Subterranean Karst Streams and Its Hydrogeochemistry Regionality, Chongqing, China [D]. Chongqing: Southwest University, 2011: 4-5.
- [5] Li X P, Zhou S P, Xu G L. Gis-based risk assessment to Karst susceptibility of Shenzhen universiade center (China). *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1389-1395.
- [6] Xing L T, Lv H, Gao Z D, Zhou R. Evaluation of groundwater vulnerability in Karst areas using COP method. *Nonferrous Metals*, 2009, 61(3): 138-142.
- [7] Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 2008, 28(1): 32-53.
- [8] van Beynen P E, Niedzielski M A, Bialkowska-Jelinska E, Alsharif K, Matusick J. Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 868-877.
- [9] Zou S Z, Zhang W H, Liang B, Chen H F, Liang X P. A discussion of the assessment of ground water vulnerability in epikarst zone of the karst area, Southwest China. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(Suppl): 152-158.
- [10] Vias J, Andreo B, Ravbar N, Hötzl H. Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(7): 1500-1510.
- [11] Ngutet V T M, Goldscheider N. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(8): 1666-1675.
- [12] Ravbar N. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Karst Waters in Slovenia; Application to the Catchment of the Podstenjšek Springs [D]. Slovenia: University of Nova Gorica, 2007.
- [13] Kattaa B, Al-Fares W, Al Charideh A R. Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(5): 1103-1110.
- [14] Wang S, Zhang C, Peng J G. Valuation and study on vulnerability of Karst Groundwater. *Ground Water*, 2008, 30(6): 14-19.
- [15] Sun F Y, Xu G Q, Tang W F. Application of the gray correlation method for groundwater vulnerability assessment and partitioning. *Ground water*, 2009, 31(4): 15-18.
- [16] Zou S Z, Liang B, Chen H F, et al. EPIK method for a. ssessing karst groundwater vulnerability and its application——exampled for Luota. *Water、Engineer、Environment and rocky desertification problems symposium*. 2003: 155-164.
- [17] Zhang Q, Jiang Y J, Lin Y S, Liu L J, Hu N. Ground water vulnerability risk assessment on Karst based on European Model. *Yangtze River*, 2009, 40(13): 51-54.
- [18] Zhao Y G. Vulnerability Assessment of Karst Groundwater Base on GIS [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [19] Zhang CH, Jiang Y J, Lettingue M, Wang S. Duality method for assessing karst groundwater vulnerability and its application in Jinpo mountain of Chongqing. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(4): 334-340.
- [20] Zhou C G, Zeng Y, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F, Luo C. Soil erodibility K value in three gorges reservoir area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(3): 8-12.
- 参考文献:**
- [3] 彭稳, 裴建国. 岩溶含水层脆弱性评价方法探讨. *水资源保护*, 2010, 26(6): 9-15.
- [4] 蒲俊兵. 重庆市地下河发育、分布的控制机制及水文地球化学区域特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011: 4-5.
- [6] 刑立亭, 吕华, 高赞东, 周瑞. 岩溶含水层脆弱性评价的 COP 法及其应用. *有色金属*, 2009, 61(3): 138-142.
- [9] 邹胜章, 张文慧, 梁彬, 陈宏峰, 梁小平. 西南岩溶区表层岩溶带脆弱性评价指标体系的探讨. *地学前缘*, 2005, 12(特刊): 152-158.
- [14] 王松, 章程, 裴建国. 岩溶地下水脆弱性评价研究. *地下水*, 2008, 30(6): 14-19.
- [15] 孙丰英, 许光泉, 唐文峰. 灰色关联度法在地下水脆弱性评价与分区中的应用. *地下水*, 2009, 31(4): 15-18.
- [16] 邹胜章, 梁彬, 陈宏峰, 等. EPIK 法在表层岩溶带脆弱性评价中的应用——以洛塔为例 // 岩溶地区水、工、环及石漠化问题学术研讨会. 2003: 155-164.
- [17] 张强, 蒋勇军, 林玉石, 刘丽红, 胡宁. 基于欧洲模型的岩溶地下水脆弱性风险性评价. *人民长江*, 2009, 40(13): 51-54.
- [18] 赵玉国. 基于 GIS 的岩溶地区地下水脆弱性评价——以重庆市老龙洞地下河流域为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [19] 章程, 蒋勇军, Lettingue M, 王松. 岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用. *中国岩溶*, 2007, 26(4): 334-340.
- [20] 周昌广, 曾毅, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 罗翀. 三峡库区土壤可蚀性 K 值研究. *中国水土保持科学*, 2010, 8(3): 8-12.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.3 Feb., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research advances and prospects of post-disaster ecological restoration assessment
..... LIU Xiaofu, WANG Wenjie, LI Jing, et al (527)
- The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting
..... PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (537)

Autecology & Fundamentals

- An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer
..... MA Lu, CAO Wenqing, ZHANG Wenjing, et al (546)
- Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus*
..... FAN Xiaoli, LIN Zhihua, DING Xianlong, et al (555)
- Effect of environmental temperature on thermogenesis and evaporative water loss in Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*)
..... LIN Lin, CAO Mengting, HU Yilin, et al (564)
- Effects of irrigation on plant growth and nitrogen use characteristics of *Calligonum caput-medusae* Schrenk seedlings
..... HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (572)
- Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil
..... ZHU Fan, HONG Xiangqi, YAN Wende, et al (581)
- Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model
..... WEI Xingping, PU Junbing, ZHAO Chunyong (589)
- Monitoring salt and water dynamics in farmland and drainage ditch in a saline environment under reduced drainage intensity
..... PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al (597)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland
..... GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang, ZHUO MA Lancuo (605)
- Biotic stress of predators on population of alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Col.: Chrysomelidae)
..... LIU Yufang, LI Fei, GUI Fangyan, et al (613)
- Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter
..... MA Wei, SUN Jun (621)
- The amount and dynamics of litterfall in the natural secondary forest in Mopan Mountain
..... FAN Chunnan, GUO Zhongling, ZHENG Jinping, et al (633)
- Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere
..... LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al (642)
- The basic principle of random forest and its applications in ecology: a case study of *Pinus yunnanensis*
..... ZHANG Lei, Wang Linlin, ZHANG Xudong, et al (650)
- Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance
..... HOU Peng, SHEN Wenming, WANG Qiao, et al (660)
- Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China
..... HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (667)
- The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang
..... HE Guixiang, LI Kaihui, SONG Wei, et al (674)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression (PLS)
..... MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al (682)
- Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone
..... DONG Linlin, YANG Hao, YU Dongsheng, et al (690)
- Molecular mechanism on carbon dioxide assimilation of autotrophic microorganism and carbon translocation in agricultural soils
..... WU Xiaohong, JIAN Yan, CHEN Xiaojuan, et al (701)

Resource and Industrial Ecology

- Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach
..... SUN Yufeng, GUO Quanying (710)
- Assessing synthetic carrying capacity based on AD-AS model: a case study in Coastal Zone, Zhoushan
..... SU Panpan, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (718)

Urban, Rural and Social Ecology

- Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression
..... LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (727)

Research Notes

- Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi
..... LIANG Ting, TONG Yan'an, LIN Wen, et al (738)
- The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area
..... LIU Xiaoyong, LI Hongxun, LI Jianming, et al (746)
- Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China
..... WANG Zhenhai, YIN Xiuqin, JIANG Yunfeng (755)
- Modeling the total allowable area for coastal reclamation: a case study of Xiamen, China
..... LIN Chenchen, RAO Huanhuan, LIU Yan, et al (766)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 3 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 3 (February, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行人

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元