

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第1期 Vol.33 No.1 **2013**

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 33 卷 第 1 期      2013 年 1 月    (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 生态整合与文明发展..... 王如松 ( 1 )
- 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展 ..... 高光耀,傅伯杰,吕一河,等 ( 12 )
- 城市林木树冠覆盖研究进展 ..... 贾宝全,王 成,邱尔发,等 ( 23 )
- 环境质量评价中的生物指示与生物监测 ..... Bernd Markert,王美娥,Simone Wünschmann,等 ( 33 )
- 水溶性有机物电子转移能力及其生态效应 ..... 毕 冉,周顺桂,袁 田,等 ( 45 )

### 个体与基础生态

- 凋落物和增温联合作用对峨眉冷杉幼苗抗氧化特征的影响 ..... 杨 阳,杨 燕,王根绪,等 ( 53 )
- 不同浓度 5-氨基乙酰丙酸(ALA)浸种对 NaCl 胁迫下番茄种子发芽率及芽苗生长的影响 .....  
..... 赵艳艳,胡晓辉,邹志荣,等 ( 62 )
- 缺镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 ..... 凌丽俐,彭良志,王男麒,等 ( 71 )
- 松嫩草地 66 种草本植物叶片性状特征..... 宋彦涛,周道玮,王 平,等 ( 79 )
- 花蜜中酚类物质对群落中同花期植物传粉的影响..... 赵广印,李建军,高 洁 ( 89 )
- 桉树枝瘿姬小蜂连续世代种群生命表..... 朱方丽,邱宝利,任顺祥 ( 97 )

### 种群、群落和生态系统

- 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值 ..... 殷晓洁,周广胜,隋兴华,等 (103)
- 河静黑叶猴果实性食物组成、选择及其对种子的扩散作用..... 阮海河,白 冰,李 宁,等 (110)
- 2010 秋季东海今生颗石藻的空间分布 ..... 靳少非,孙 军,刘志亮 (120)
- OPRK1 基因 SNP 与梅花鹿日间行为性状的相关性 ..... 吕慎金,杨 燕,魏万红 (132)
- 鄱阳湖流域非繁殖期鸟类多样性 ..... 邵明勤,曾宾宾,徐贤柱,等 (140)
- 人工巢箱条件下两种山雀鸟类的同域共存机制 ..... 李 乐,张 雷,殷江霞,等 (150)
- 桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态 ..... 李艳红,杨万勤,罗承德,等 (159)
- 三峡库区生态系统服务功能重要性评价 ..... 李月臣,刘春霞,闵 婕,等 (168)

### 景观、区域和全球生态

- 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征 ..... 李林海,郜二虎,梦 梦,等 (179)
- 海岸带地理特征对沉水植被丰度的影响..... 吴明丽,李叙勇,陈年来 (188)
- 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质 ..... 曹国栋,陈接华,夏 军,等 (195)

### 资源与产业生态

- 农田开垦对三江平原湿地土壤种子库影响及湿地恢复潜力 ..... 王国栋,Beth A Middleton,吕宪国,等 (205)
- 漫溢干扰过程中微地形对幼苗定居的影响 ..... 安红燕,徐海量,叶 茂,等 (214)
- 黑龙江流域夏玉米产量提升限制因素 ..... 徐丽娜,陶洪斌,黄收兵,等 (222)
- 黑龙江省药用植物根际土壤真菌多样性 ..... 慕东艳,吕国忠,孙晓东,等 (229)

桑沟湾养殖生态系统健康综合评价 ..... 傅明珠,蒲新明,王宗灵,等 (238)

城乡与社会生态

基于“OOAO 原则”的罗源湾生态质量状况综合评价 ..... 吴海燕,吴耀建,陈克亮,等 (249)

四十里湾营养状况与浮游植物生态特征 ..... 李 斌,白艳艳,邢红艳,等 (260)

生态足迹深度和广度:构建三维模型的新指标 ..... 方 恺 (267)

中国东西部中小城市景观格局及其驱动力 ..... 齐 杨,邬建国,李建龙,等 (275)

研究简报

南海陆坡沉积物细菌丰度预测 ..... 李 涛,王 鹏 (286)

浑善达克沙地榆树疏林幼苗更新空间格局 ..... 刘 振,董 智,李红丽,等 (294)

光 and 不同打破种子休眠方法对紫茎泽兰种子萌发及幼苗状态的影响 ..... 姜 勇,李艳红,王文杰,等 (302)

学术争鸣

关于植物群丛划分的探讨 ..... 邢韶华,于梦凡,杨立娟,等 (310)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 316 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 35 \* 2013-01



**封面图说:** 外来入侵物种紫茎泽兰——紫茎泽兰约于 20 世纪 40 年代由缅甸传入中国云南南部后迅速蔓延,现已在云南、贵州、四川、广西、重庆、湖北、西藏等省区广泛分布和危害,并仍以每年大约 30 km 的速度扩散。紫茎泽兰为多年生草本或亚灌木,号称“植物界杀手”。其对环境的适应性极强,疯长蔓延,能极大耗损土壤肥力。它的植株能释放多种化感物质,排挤其他植物生长而形成单优种群,它破坏生物多样性,威胁到农作物、畜牧草甚至林木,且花粉能引起人类过敏性疾病等,目前尚无有效治理对策。

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



DOI: 10.5846/stxb201107020989

李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. 生态学报, 2013, 33(1): 0168-0178.

Li Y C, Liu C X, Min J, Wang C J, Zhang H, Wang Y. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section). Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 0168-0178.

## 三峡库区生态系统服务功能重要性评价

李月臣<sup>1,2,3</sup>, 刘春霞<sup>1,\*</sup>, 闵 婕<sup>1</sup>, 王才军<sup>1</sup>, 张 虹<sup>1</sup>, 汪 洋<sup>1</sup>

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

2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 3. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘要:**在 RS 与 GIS 技术支持下,选择研究区比较重要的生物多样性保护、土壤保持、水源涵养和营养物质保持四个生态系统服务功能,建立生态系统服务功能重要性评价模型与方法,对三峡库区重庆段生态系统服务功能进行综合研究,定量揭示了研究区生态系统服务功能重要性程度及其空间分布规律。结果表明:(1)生物多样性保护高度重要以上地区的面积比达到了 15% 以上;极重要地区主要呈斑块状分布在东北部、中部和东南部。(2)土壤保持极重要区占据绝对优势地位,面积比为 68.80%;土壤保持极重要区主要分布在万州及其东北部地区。(3)水源涵养一般重要区面积最大,其次为极重要地区;极重要区沿江河呈带状分布,高度重要区主要分布在极重要区两侧沿江河呈环带状分布。(4)营养物质保持一般重要区面积最大;其次是极重要区;极重要区基本呈条带形分布在植被覆盖较好的山脉及江河两侧。(5)生态系统服务功能极重要和高度重要区的面积占到了研究区总面积的近 50%;极重要区基本沿主要江河两侧第一层分水岭和西部平行岭谷区的山脊呈条带形分布;高度重要区基本分布在极重要区两侧层环带形分布,少部分零散分布。

**关键词:**生态系统服务功能重要性;生物多样性保护;水源涵养;土壤保持;营养物质保持;三峡库区;重庆

## RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)

LI Yuechen<sup>1,2,3</sup>, LIU Chunxia<sup>1,\*</sup>, MIN Jie<sup>1</sup>, WANG Caijun<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>

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

2 Chongqing Institute of Meteorological Science, Chongqing 401147, China

3 School of Civil Engineering Architecture and Construction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

**Abstract:** This paper selected four major ecosystem services, biodiversity conservation, soil conservation, water conservation and nutrients conservation, to evaluate the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir (TGR) area using GIS and RS techniques. We investigated the importance and spatial distribution of these services in a quantitative way. The results indicate that: (1) The percentage of the area with extremely and strongly important biodiversity conservation service reaches 15% of the total TGR area. The areas with extremely important biodiversity conservation present patchy distributions in the northeastern, central and southeastern parts of the TGR area; (2) The percentage of the areas with extremely important soil conservation is 68.80%. These areas are mainly distribute in Wanzhou and the regions northeast to Wanzhou; (3) The areas dominated by the slightly important water conservation service are widely distributed in the study region and are followed by those with extremely important water conservation service. The areas with extremely important water conservation service are located along the main streams, and the areas with moderately important water conservation

**基金项目:**重庆市气象局开放基金(Kfj-201103);资源环境与生态建设重庆市高校创新团队基金;重庆市地理学重点学科基金;国家自然科学基金(40801077);教育部重点项目(209100);重庆市自然科学基金(CSTC,2008BB7367);重庆市教委科技项目(KJ070811)

收稿日期:2011-07-02; 修订日期:2012-07-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuchunxia\_2004@163.com

service are distributed along the two sides of the main streams; (4) The areas with slightly important nutrients conservation service occupy the largest areas of the TGR area and are followed by those with extremely important nutrients conservation. The areas with extremely important nutrients conservation service are mainly distributed in zonal distribution along two sides of the rivers and streams, and the ridges; (5) The percentage of the areas with extremely and moderately important ecosystem services is about 50%. The areas with extremely important ecosystem services are distributed along the first watershed of main rivers and streams, and the ridges in the paralleled ridge-valley region in the west of the study region. The areas with moderately important ecosystem services are mainly distributed along the two sides of the above-mentioned areas and scatteringly distributed along the main streams.

**Key Words:** importance of ecosystem service; biodiversity conservation; water conservation; soil conservation; nutrients conservation; the Three Gorges Reservoir area ; Chongqing

生态系统服务功能是生态系统及其生态过程所形成与维持的人类赖以生存的自然环境条件和效用<sup>[1-6]</sup>。生态系统不仅为人类提供了食品、医药及其他生产生活原料,更重要的是维持了人类赖以生存的生命支持系统,维持了生命物质的生物地化循环与水文循环和生物物种与遗传多样性<sup>[7]</sup>。因此,生态系统服务功能的研究备受关注,成为生态学研究的前沿和热点。国内外很多学者都对生态系统服务功能进行了研究。Holdren<sup>[8]</sup>与 Ehrlich<sup>[9]</sup>论述了生态系统在土壤肥力与基因库维持中的作用,并系统地讨论了生物多样性的丧失将会怎样影响生态服务功能。1997 年 Costanza 等<sup>[10]</sup>研究了全球生态系统服务的自然资本的价值估算,有力地推动了生态系统服务功能经济价值评价研究。此后,很多学者应用 Costanza 等方法对不同地区的不同生态系统的服务价值进行了研究<sup>[11-13]</sup>。同期,我国学者针对全国陆地生态系统综合服务功能<sup>[14-15]</sup>;以及森林<sup>[16-21]</sup>,草地<sup>[22-24]</sup>,农田<sup>[25-27]</sup>,湿地<sup>[28-29]</sup>,河流<sup>[30]</sup>,城市<sup>[31]</sup>等单一生态系统类型服务功能进行了大量深入的研究工作。目前,建立复杂环境条件下生态系统服务功能评价方法;揭示景观和区域尺度生态系统服务的表征、相互作用和时空变异规律;评估重点地区生态系统重要生态服务功能成为生态服务功能研究的重要研究内容<sup>[5,32]</sup>。上述研究提高了人们对区域生态系统服务功能研究的认识与理解,但同时也都不同程度的存在一些局限:(1)多集中在对单一生态系统服务功能的分析,生态系统服务功能综合研究较少;(2)多限于利用单位面积价值对总量的静态估算,而对生态服务功能重要性研究缺乏;(3)对生态系统类型、质量状况的时空差异缺乏考虑,缺少如三峡库区等典型生态系统敏感区域生态系统服务功能的综合研究。生态系统服务具有空间异质性,不同生态系统的空间差异性导致了生态系统服务的空间差异性,同一生态系统在不同区域也会提供不同的生态服务功能<sup>[32]</sup>。

三峡库区(重庆段)位于长江上游的末端,是长江流域生态屏障的咽喉,复杂的自然生态条件和社会经济特征决定了其重要的生态地理位置。本区是中国乃至世界最为特殊的生态功能区之一,也是关系到长江流域生态安全的全国性生态屏障地区。显见,这一区域生态系统服务功能重要性的研究具有重要理论与实践意义。鉴于此,本文以三峡库区(重庆段)为研究区,借助 RS 与 GIS 技术,对本区域生态系统服务功能重要性进行综合研究,针对区域生态系统,分析其提供的不同生态系统服务功能,研究生态系统服务功能区域分异规律,明确各种生态系统服务的重要区域。目的在于丰富三峡库区生态环境问题研究,为区域生态系统管理、确定生态保护关键区、制定生态保护和建设的政策提供科学依据。

## 1 研究区概况

三峡库区(重庆段)位于长江上游末端,地理范围在北纬 28°31′—31°44′、东经 105°49′—110°12′之间。东南、东北与鄂西交界,西南与川黔接壤,西北与川陕相邻,包括重庆市 22 个区、县,幅员面积 46158.53 km<sup>2</sup>,约占整个三峡库区面积的 80%。2009 年末户籍总人口为 1923.50 万人,其中农业人口 1243.24 万人。2009 年重庆三峡库区农村各业总产值 4858747 万元,农民人均纯收入 4652 元(含重庆市主城区)<sup>[33]</sup>。研究区属亚热带季风性湿润气候区,多年平均气温 15—18℃,气温年较差和日较差大,具有冬暖春早、夏热秋迟的特点。多

年平均降雨量为 1150.26mm,雨量充沛但空间分布不均匀。区内日照少,雾日多。三峡库区(重庆段)地跨大巴山断褶带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元,地貌以山地、丘陵为主。全区土壤类型主要有紫色土(紫色湿润锥形土)、黄壤(铁质常湿淋溶土)、黄棕壤(铁质湿润淋溶土)、棕壤(筒育湿润锥形土)、石灰(岩)土(钙质湿润淋溶土)、潮土(淡色湿润锥形土)、水稻土(水耕人为土)、粗骨土(石质湿润正常新成土)、新积土(新成土)、山地草甸土(暗色湿润锥形土)等<sup>[34]</sup>。区域植被类型丰富,地带性植被以亚热带常绿阔叶林、暖性针叶林为主,森林覆盖率为 22.3%。在植物地理区划上本区属亚热带常绿阔叶林区,由于本区地势较低,第四纪大陆冰期气候对本区的影响甚微,成为珍贵动植物的避难所,物种资源丰富,区内共有植物 6000 余种,脊椎动物 450 余种,属于中国 17 个具有全球保护意义的生物多样性关键地区之一。区内水系发育,属长江水系。大部分河流具有降水丰沛且多暴雨、河谷切割深、谷坡陡峻、天然落差大、滩多水急、陡涨陡落等山区河流的特点,是区内产生坡面侵蚀和重力侵蚀等水土流失的重要因素之一。由于受降雨的年内分配和暴雨历时短与强度大等特点的影响,区内地表径流和泥沙多集中在 5—9 月份,随各月降雨量的不同,其在年内和年际的变化与降雨量的年内年际分布基本一致,体现出时间分布不均匀的特点。

## 2 数据获取与处理

研究所用的数据主要由 5 部分组成:1)2005 年重庆市植被类型图;2002 年重庆市森林资源二类调查图;重庆市国家级和省级重点保护物种和特有、珍惜、濒危物种分布图;重庆市自然保护区、森林公园、风景名胜区、其他关键生态区分布图。数据来源于重庆市环保局、重庆市林业局。2)重庆市河流、湖泊、水源地分布图。数据来源于重庆市水利局。3)研究区水土流失强度类型图(2005 年;分级标准采用水利部发布的水土流失(土壤侵蚀)分类分级标准(SL190—96))、土地利用类型图(2005 年)、DEM 数据(1:5 万)、土壤类型数据。其中水土流失强度数据和土地利用数据均为重庆市水利局在 2004 年开展水土流失普查时与相关研究单位合作,通过 TM 遥感影像解译获得。这些数据均经过野外校验,并通过相关部门和专家的验收,数据精度符合要求。4)由重庆市气象局提供的研究区各气象站点各气象要素统计数据(1971—2007 年)。5)以上数据派生的数据;以及一些相关的辅助数据,如行政区划图等。为了便于空间运算,所有数据均统一转换成 Albers 等积投影的栅格(grid)数据参与空间运算。

## 3 研究方法

本文借助 RS 与 GIS 技术,在已有的研究成果的基础上,结合三峡库区(重庆段)的自然和社会经济实际情况,参照国家环保部颁发的《生态功能区划技术暂行规程》<sup>①</sup>,选择比较重要的生物多样性保护、土壤保持、水源涵养和营养物质保持 4 个生态系统服务功能建立评价模型与方法,对三峡库区(重庆段)生态系统服务功能重要性进行综合研究,定量揭示研究区生态系统服务功能重要性及其空间分布规律。

### 3.1 生物多样性保护重要性评价方法

生物多样性保护重要性评价就是评价区域内各地区对生物多样性保护的重要性。《生态功能区划技术暂行规程》<sup>①</sup>要求根据物种数量来评价生物多样性保护重要性。但是,就实际情况而言,各保护物种很难落实到确切的空间中,而物种多样性很大程度上反映在其赖以生存的生态系统特征。因此,本文借鉴相关研究成果<sup>[35-36]</sup>,并征询专家意见,结合三峡库区实际情况,选择国家及省级重点保护物种和特有、珍稀、濒危物种分布带,结合自然保护区、森林公园、风景名胜区等关键生态区范围进行划分,确定研究区生物多样性保护重要性等级(表 1,图 1)。

### 3.2 土壤保持重要性评价方法

土壤保持重要性的评价在考虑土壤侵蚀敏感性的基础上,分析其可能造成的对下游河流和水资源的危害程度。首先根据前期研究成果,利用降雨、土壤类型、DEM、土地利用等数据,运用通用水土流失通用方程的基本原理,选择了降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长坡度因子以及地表植被覆盖因子,对研究区土壤侵蚀敏感性

① ① 国家环境保护总局. 生态功能区划技术暂行规程. 北京: 国家环境保护总局, 2002

进行分析与评价<sup>[34]</sup>,然后将河流、湖泊及水源地与土壤侵蚀敏感分布图进行叠加,最后根据表 2 的分级标准对研究区土壤保持重要性进行评价与分级(图 1)。

表 1 生物多样性保护重要性评价分级表

Table 1 Assessment levels of importance for biodiversity conservation	
分级 Classification	生态区类型 Ecological regions
极重要 Extremely important	国家一级重点保护动植物、珍惜濒危动植物分布区;国家级自然保护区、森林公园、风景名胜区
高度重要 Strongly important	国家二级重点保护动植物、珍惜濒危动植物分布区;省级自然保护区、森林公园、风景名胜区;“四山”保护区*
中等重要 Moderately important	其他国家和省级保护动植物分布区;县级自然保护区、森林公园、风景名胜区
一般重要 Slightly important	其他地区

2007 年,重庆市政府出台了《重庆市“四山”地区开发建设管制规定》,将缙云山、中梁山、铜锣山和明月山的生态绿地和城市绿地划定为建设管制区加以保护,简称“四山”保护区

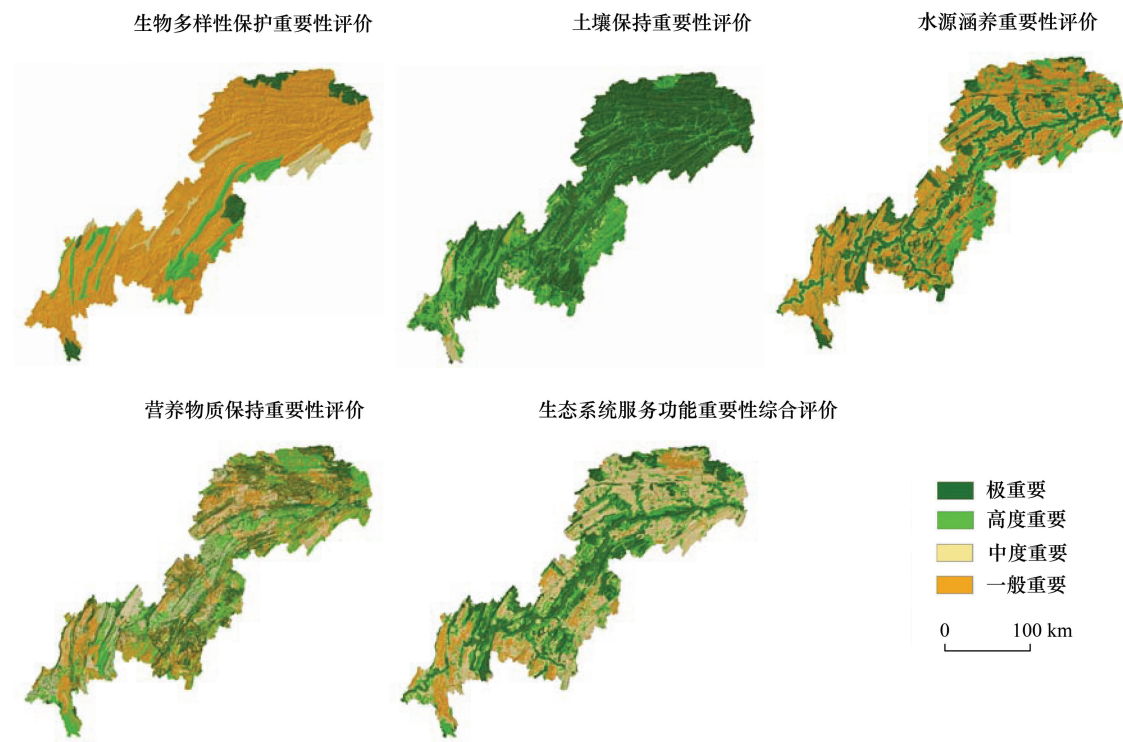


图 1 三峡库区重庆段生态系统服务功能重要性评价图

Fig.1 The assessment on ecosystem services

表 2 土壤保持重要性分级表

Table 2 Assessment levels of soil conservation importance					
影响水体 Affected water body	土壤侵蚀敏感性 Sensitivity of Soil Erosion				
	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slightly sensitive	中度敏感 Moderately sensitive	高度敏感 Strongly sensitive	极敏感 Extremely sensitive
1—2 级河流及大中城市主要水源水体 The first and second level rivers; The drinking water bodies of the large and medium-sized cities	一般重要	高度重要	极重要	极重要	极重要
3 级河流及小城市水源水体 The third level rivers; The drinking water bodies of the towns	一般重要	中等重要	高度重要	高度重要	极重要
4—5 级河流 The fourth and fifth level rivers	一般重要	一般重要	中等重要	高度重要	高度重要



### 3.3 水源涵养重要性评价方法

水源涵养的生态重要性在于评价地区提供水资源保障及洪水调节作用。因此,可以根据评价地区在流域所处的地理位置,以及对整个流域水资源的贡献来评价。可根据不同气候类型下水资源保障及洪水调蓄的重要性进行分级。三峡库区属亚热带湿润气候,按《生态功能区划技术暂行规程规程》评价方法,研究水源涵养重要性只包括极重要和一般重要两级,为区别区域内部差异,在考虑国家分级标准和研究区实际情况后,参考相关研究成果<sup>[37-40]</sup>,加入湖泊、水库、水源集水区、各种水源涵养林、河流两侧水源涵养缓冲区等因素进行分析与评价(表3,图1)。

表3 水源涵养重要性分级表

Table 3 Assessment levels of importance for water conservation

影响目标 Affected targets	类型、范围 The types and areas of influence		分级 Classification
河流 River	主干河流三峡库区消落带 (城市水源、洪水调蓄)	河流两侧 1km	极重要
		河流两侧 2km	高度重要
		河流两侧 3km	中等重要
	二级河流(水源、洪水调蓄)	河流两侧 200m	极重要
		河流两侧 400m	高度重要
		河流两侧 600m	中等重要
湖泊、水库水源保护地(水源、洪水调蓄) Lake, reservoir, water source protection area			极重要
林地 Forest	水源涵养林(水源)	常绿阔叶林、常绿针阔混交林、常绿落叶阔叶混交林	极重要
		灌丛、常绿针叶林、竹林	高度重要
		落叶阔叶林、针阔混交林、经济林木	中等重要
农业区及其它地区 Agricultural and other areas			一般重要

### 3.4 营养物质保持重要性评价方法

依据《生态功能区划技术暂行规程规程》营养物质保持重要性评价方法,参考相关成果<sup>[41-42]</sup>,主要从面源污染与湖泊湿地的富营养化问题的角度及区域生态系统类型或土地利用类型自身的营养物质保持功能两方面考虑。首先,根据评价地区 N、P 流失可能造成的富营养化后果与严重程度进行分析。若评价地区下游有重要的湖泊与水源地,该地区的营养物质保持的重要性大。否则,重要性不大。先根据水系图,划分出重要湖泊湿地和一般湖泊湿地,然后利用 DEM 数据划出湖泊湿地的汇水区;然后根据湖泊湿地的重要性及其所在河流的级别、湖泊湿地在河流上的位置,确定湖泊湿地汇水区营养物质保持重要性级别(表4);其次,根据区域生态系统类型或土地利用类型本身营养物质保持功能性质,结合基于位置的营养物质保持重要性评价结果进行综合考虑(表4),最后形成营养物质保持重要性分布图(图1)。

### 3.5 生态系统服务功能重要性综合评价方法

单因子的生态系统服务功能重要性反映了生态系统某单一服务功能的重要性程度,没有将研究区生态系统综合服务功能的空间变异特征综合反映出来。根据各因子的分级及赋值,利用 ArcGIS 的空间叠加功能,将上述各单因子敏感性影响分布图进行叠加计算,公式如下:

$$ESI_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 ES_i} \quad (1)$$

式中,  $ESI_j$  为  $j$  空间单元生态系统综合服务功能重要性指数;  $ES_i$  为  $i$  生态系统服务功能重要性等级值。然后采用自然分界法(Natural break, ArcGIS 的这种分类方法是利用统计学的 Jenk 最优化法得出的分界点,能够使各级的内部方差之和最小)<sup>[43]</sup>,将 ESI 分为 4 级,绘制出三峡库区(重庆段)生态系统服务功能重要性综合评价图(图1)。



表 4 营养物质保持重要性分级表

Table 4 Assessment levels of importance for nutrients conservation importance					
河流级别 The level of rivers	位 置 Location	影响目标 The affected targets		分级 Classification	
1,2,3	河流上游	重要湖泊湿地		极重要	
	The upper reaches of rivers	一般湖泊湿地		中等重要	
	河流中游	重要湖泊湿地		中等重要	
	The middle reaches of rivers	一般湖泊湿地		高度重要	
	河流下游	重要湖泊湿地		高度重要	
	The lower reaches of rivers	一般湖泊湿地		一般重要	
4,5	河流上游	重要湖泊湿地		中等重要	
	The upper reaches of rivers	一般湖泊湿地		高度重要	
	河流中游	重要湖泊湿地		高度重要	
	The middle reaches of rivers	一般湖泊湿地		一般重要	
	河流下游	重要湖泊湿地		一般重要	
	The lower reaches of rivers	一般湖泊湿地		一般重要	
其它 Others	河流上游	重要湖泊湿地		高度重要	
	The upper reaches of rivers	一般湖泊湿地		一般重要	
	河流中游	重要湖泊湿地		一般重要	
	The middle reaches of rivers	一般湖泊湿地		一般重要	
	河流下游	重要湖泊湿地		一般重要	
	The lower reaches of rivers	一般湖泊湿地		一般重要	
土地利用类型 Type of land use		基于位置的重要性 Nutriment conservation importance based on location			
		极重要	高度重要	中等重要	一般重要
水田 Paddy field		高度重要	中等重要	一般重要	一般重要
旱地 Dry land		中等重要	一般重要	一般重要	一般重要
有林地 Forest land		极重要	极重要	高度重要	高度重要
疏林地 Sparse woodland		高度重要	高度重要	中等重要	中等重要灌木林
Shrubbery		极重要	极重要	高度重要	高度重要
其他林地 Other woodland		高度重要	中等重要	一般重要	一般重要
高覆盖草地 High coverage grassland		高度重要	高度重要	中等重要	中等重要
中覆盖度草地 Middle coverage grassland		高度重要	中等重要	一般重要	一般重要
低覆盖草地 Low coverage grassland		中等重要	中等重要	一般重要	一般重要
城镇建设用地 Urban and Construction land		一般重要	一般重要	一般重要	一般重要
裸地 Bare land		一般重要	一般重要	一般重要	一般重要

重要湖泊湿地包括重要水源地、自然保护区、保护物种栖息地

4 结果分析

4.1 生物多样性保护重要性评价

4.1.1 生物多样性保护重要性的数量特征

从表 5 中可以看出,研究区生物多样性保护重要性类型以一般重要为主,面积为 36588.87km<sup>2</sup>,面积比为 79.27%;其次为高度重要地区,面积为 4698.15 km<sup>2</sup>,比例为 10.18%;极重要地区和中等重要地区的面积基本相当,分别为 2445.66 km<sup>2</sup> 和 2425.85km<sup>2</sup>,面积比分别为 5.30% 和 5.26%。虽然,研究区生物多样性保护以一般重要地区占据优势地位,但是生物多样性保护高度重要以上地区的面积比也达到了 15% 以上。就各区县生物多样性保护重要性的数量特征而言,巫溪、石柱、江津、巫山、开县生物多样性保护极重要区面积最大,基本都在 200km<sup>2</sup> 以上(其中,巫溪和石柱面积最大,分别为 815.68km<sup>2</sup> 和 687.09 km<sup>2</sup>),面积比例也最高,基本都在 10% 以上。北碚虽然极重要区面积仅 68.25km<sup>2</sup>,但其面积比也近 10%。生物多样性保护高度重要区的面积比较大的区县主要有武隆、石柱、万州、丰都、渝北等区县,高度重要类型区面积都在 450km<sup>2</sup> 以上,面

积比也都超过了 20% ;北碚、沙坪坝、九龙坡、南岸、大渡口等都市区内的区县虽然生态系统服务功能高度重要区面积不是很大,但比例较高,也都超过了 20% ,沙坪坝甚至接近 35% 。

表 5 生态系统服务功能重要性综合评价结果表

Table 5 The assessment on ecosystem services

分级 Classification	生物多样性 保护重要性 Biodiversity conservation importance		土壤保持重要性 Soil conservation importance		水源涵养重要性 Water conservation importance		营养物质 保持重要性 Nutrients conservation importance		生态系统综合 服务功能重要性 Ecosystem services importance	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
极重要 Extremely important	2445.66	5.30	31756.37	68.80	13747.31	29.78	12433.41	26.94	17009.23	36.85
高度重要 Strongly important	4698.15	10.18	12410.68	26.89	8947.62	19.38	9840.56	21.32	5529.74	11.98
中等重要 Moderately important	2425.85	5.26	1751.78	3.80	2435.07	5.28	11011.71	23.86	19382.79	41.99
一般重要 Slightly important	36588.87	79.27	239.70	0.52	21028.52	45.56	12872.85	27.89	4236.77	9.18

#### 4.1.2 生物多样性保护重要性的空间特征

全区除一般重要地区由于面积较大,呈连片分布外,其他生物多样性保护重要性类型空间分布的总体特征表现为条带形和斑块状分布。极重要地区主要呈斑块状分布在东北部、中部和东南部。高度重要性区基本呈条带状沿武陵山、方斗山、齐曜山、及都市区的缙云山、中梁山、铜锣山、明月山“四山”的山脊分布(图 1)。通过观察发现,高度以上生物多样性保护重要性地区基本分布在国家一、二级重点保护和珍惜、濒危动植物分布区或国家级自然保护区、森林公园和风景名胜区,均位于重庆市生物多样性保护关键区内。这些地区植被覆盖良好,生态系统多样,物种丰富,生物多样性价值高,对维持区域生物多样性发挥着重要作用。

#### 4.2 土壤保持重要性评价

##### 4.2.1 土壤保持重要性的数量特征

研究区土壤保持重要性类型以极重要占据绝对优势地位,面积为 31756.37km<sup>2</sup>,面积比为 68.80% ;其次为高度重要地区,面积和比例分别为 12410.68km<sup>2</sup> 和 26.89% ;中等重要和一般重要区面积较小,不足 5% 。总体上,全区土壤保持重要性从极重要到一般重要呈倒金字塔形分布(表 5)。就各区县土壤保持重要性的数量特征而言,巫溪、奉节、开县、万州、巫山、丰都、武隆、石柱土壤保持极重要区无论是面积(均超过 2000km<sup>2</sup>) 和比例(均在 80% 以上)都远高于其他区县;土壤保持中等以下重要地区主要分布在都市区及周边区县,但面积比都在 8% 以下。

##### 4.2.2 土壤保持重要性的空间特征

空间上,万州及其东北部地区基本上属于土壤保持重要区,主要类型以极重要为主(面积占研究区土壤保持极重要区面积的 55% 以上),少量高度重要地区仅分布在长江及主要支流河谷地带。涪陵-长寿至万州的中部地区主要为极重要-高度重要区,极重要区主要分布在忠县和丰都的大部分地区、石柱的西南部地区、武隆的乌江以东和以北地区;高度重要地区主要分布在石柱东南大部、长寿和涪陵大部,以及沿长江、乌江及各主要支流的河谷地区;此外,在长寿北部、涪陵南部以及石柱和丰都中部还有少量中等重要和一般重要地区分布。西部的都市区及周边区县为高度重要-极度重要地区,高度重要地区主要分布在平行岭谷的山谷和江河河谷地区;极度重要区主要分布在平行岭谷的山脊区;此外,研究区的中等重要以下地区主要分布在本区的南、北、西三个端点地区(图 1)。

#### 4.3 水源涵养重要性评价

##### 4.3.1 水源涵养重要性的数量特征

总体上研究区水源涵养重要性各类型区面积和比例呈“U”形,即两端类型面积和比例大,中间类型面积

和比例小。区内水源涵养一般重要区面积最大,为 21028.52 km<sup>2</sup>,面积比为 45.56%;其次为极重要区,其面积和比例分别为 13747.31 km<sup>2</sup> 和 29.78%;区内水源涵养高度重要以上地区面积占了近 50%(表 5)。各区县中,极重要区面积在 700 km<sup>2</sup> 以上的区县主要有涪陵、万州、开县、云阳、奉节、武隆、巴南、江津、巫溪、长寿、忠县、丰都和巫山 13 个区县,部分区县如渝北、江北、南岸等虽然面积相对较小,但比例较高,都在 30% 以上,有的甚至超过了 50%;高度重要地区面积比例较大的区县有石柱、奉节、巫溪、巫山、万州、丰都、武隆等区县,面积比都在 20% 以上。

#### 4.3.2 水源涵养重要性的空间特征

研究区水源涵养重要性空间分布的总体特征表现为极重要区沿江河呈带状分布,少部分极重要区呈斑块状散布;高度重要区除石柱、丰都部分地区呈片状集中分布外,其余均主要分布在极重要区两侧沿江河呈环带状分布,以及东北部地区零星块状分布;中等重要地区主要沿江河呈环带状分布在高度重要区外侧;一般重要区由于面积较大,呈连片分布(图 1)。通过观察可以发现,研究区水源涵养极重要和高度重要区基本分布在长江及其主要支流两侧第一层山脊线以内的库区生态屏障带内,对维持水库水质、减少泥沙淤积、雨水汇流、调蓄洪水等都发挥着极其重要的作用。

#### 4.4 营养物质保持重要性评价

##### 4.4.1 营养物质保持重要性的数量特征

研究区营养物质保持数量上也基本呈“U”形分布,但比例相对均衡。一般重要区面积最大(12872.85 km<sup>2</sup>),占了全区面积的 27.89%;其次是极重要区(12433.41 km<sup>2</sup>),其比例为 26.94%;中等重要和高度重要区面积分别为 11011.71 km<sup>2</sup> 和 9840.56 km<sup>2</sup>,面积比为 23.86% 和 21.32%。区内营养物质保持高度重要以上面积比占了研究区总面积的近 50% 多,可见本区营养物质保持的重要性。各区县中,巫溪、丰都、开县、奉节、万州、云阳、涪陵、石柱和武隆极重要区面积都超过了 800 km<sup>2</sup>,比例也基本都超过了 25%。另外一些区县如忠县、巫山、长寿、北碚、江北等,虽然极重要区面积相对要小,但比例也基本都在 25% 以上。高度重要区中巫溪、奉节、江津、巫山、石柱、万州面积较大,也都在 800 km<sup>2</sup> 以上,面积比也较大。本区内高度以上营养物质保持重要性比例超过 50% 的区县分别为巫溪、巫山、石柱、江北、涪陵、奉节、江津、丰都、万州,这些区域在营养物质保持中发挥着重要作用。

##### 4.4.2 营养物质保持重要性的空间特征

总体上,研究区内营养物质保持高度重要以上区域基本分布在植被覆盖较好的山脉、及江河两侧,尤其在长江及主要河流两岸的第一层分水岭的山地及山间盆地区,大多呈条带状和片状分布。高度以上重要性区在西部主要分布在平行岭谷的山脊及部分山间丘陵盆地区;中部和东北部主要山地分布区和长江及主要支流两岸地区。中等以下重要区主要分布在山间丘陵盆地,呈片状和团块状分布(图 1)。

#### 4.5 生态系统服务功能重要性综合评价

##### 4.5.1 生态系统服务功能重要性的数量特征

从表 5 可以看出,研究区生态系统服务功能极重要和高度重要区的面积和比例分别为 17009.23 km<sup>2</sup>, 36.85% 和 5529.74 km<sup>2</sup>, 11.98%。二者占了研究区总面积的近 50%,由此可见本区生态系统服务功能的重要性。中等重要区面积和比例是各类型区中最大的,分别为 19382.79 km<sup>2</sup> 和 41.99%。一般重要区面积和比例最小,为 4236.77 km<sup>2</sup> 和 9.18%。各区县中极重要区面积在 1000 km<sup>2</sup> 以上的区县有巫溪、万州、石柱、开县、奉节、巫山、云阳、丰都、武隆、涪陵。这些区县除涪陵外均分布在研究区的东北部和东南部,这些地区是三峡水库和武陵山区的核心地带,生物多样性高,属生境、水土流失和石漠化等较敏感的地区,这一地区对维持库区和武陵山区生态系统的稳定及其服务功能的发挥具有重要作用。另外一些区县,如江北、长寿、渝北、巴南、南岸、忠县、北碚、长寿等虽然极重要区面积相对较小,但在本区县的面积比也都超过了 30%。各区县高度重要区面积和比例的数量特征与极重要区基本一致,也是东北部区县(万州、云阳、奉节、巫山、开县、丰都、巫溪等区县都在 250 km<sup>2</sup> 以上)和西部的江津(233.57 km<sup>2</sup>)、长寿(245.93 km<sup>2</sup>)、巴南(245.42 km<sup>2</sup>)、涪陵



(422.49 km<sup>2</sup>)和中南部的石柱(339.25 km<sup>2</sup>)、武隆(270.65 km<sup>2</sup>)面积较大。

#### 4.5.1 生态系统服务功能重要性的空间特征

空间上,生态系统服务功能极重要区基本是沿长江、乌江、小江、汤溪河、梅溪河、大宁河等主要江河及其他一些主要河流两侧第一层分水岭呈条带形分布;西部平行岭谷区的缙云山、中梁山、铜锣山、明月山等山体的山脊也呈带状分布着极重要区;此外,还有一部分极重要区呈团块状散布在东北部、中部和西南部地区,主要分布在开县的北部、巫溪的西北角和东北角、巫山的北端、石柱的西端、丰都-武隆-涪陵的交接处、长寿的北部、巴南的东部和江津的南端少部分地区。高度重要区基本沿极重要区两侧呈环带形分布,少部分零散分布。中等重要区集中连片分布在东北部的开县、巫溪、云阳、奉节、巫山、万州,以及中部的忠县、丰都、石柱等区县;其他地区基本呈星状散布,尤其是西部地区。一般重要区则主要集中分布在西部和中部地区,西部的都市区一般重要区分布最为集中;中南部的涪陵南部、武隆南部也有大面积分布;此外,丰都东部、石柱西南部、忠县西南角也有一定面积分布;东北部主要在巫溪中部、巫山西北和南部、奉节西端和南部有一部分一般重要区呈团块状点缀分布在其他类型区之间(图1)。

### 5 结论与讨论

三峡库区(重庆段)具有重要的生态地理位置,是中国乃至世界最为特殊的生态功能区之一。这一区域对维护区域生态系统稳定具有重要意义,该区域为长江流域甚至全国都提供着重要的生态服务功能。鉴于研究区生态系统服务功能的重要性以及目前相关研究的局限性,本文从生物多样性保护、土壤保持、水源涵养以及营养物质保持等本区最为主要的生态系统服务功能入手,对研究区的生态系统服务功能进行了深入细致的分析,定量揭示了研究区生态系统覆盖功能重要性程度及其空间分布特征与规律。

研究结果表明:(1)生物多样性保护高度重要以上地区的面积比达到了15%以上;极重要地区主要呈斑块状分布在东北部、中部和东南部。(2)土壤保持极重要区占据绝对优势地位,面积比为68.80%;土壤保持极重要区主要分布在万州及其东北部地区。(3)水源涵养一般重要区面积最大,其次为极重要地区;极重要区沿江河呈带状分布,高度重要区主要分布在极重要区两侧沿江河呈环带状分布。(4)营养物质保持一般重要区面积最大;其次是极重要区;极重要区基本呈条带形分布在植被覆盖较好的山脉、及江河两侧。(5)生态系统服务功能极重要和高度重要区的面积占到了研究区总面积的近50%;极重要区基本沿主要江河两侧第一层分水岭和西部平行岭谷区的山脊呈条带形分布;高度重要区基本沿极重要区两侧呈环带状分布,少部分零散分布。

需要说明的是,本文研究的基础数据均由遥感影像解译或者GIS空间分析得到,数据处理存在的误差必然会影响到分析结果的准确性,尽管如此,研究区生态系统服务功能重要性的地理空间格局特征仍然能够得以充分反映。同时,由于数据的缺乏,本研究仅对区域单一时段的生态系统服务功能重要性进行研究,若能有时序数据则更能反映研究区生态系统服务功能的时空演变规律。因此,丰富数据来源,提高数据的准确性,辨识区域生态系统服务功能的内在机制,在此基础上,确定生态保护关键区、建立有效的生态环境保护机制,为生态保护和建设提供科学依据。

### References:

- [1] Millennium Ecosystem Assessment Series. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. Washington D C: Island Press, 2003.
- [2] Daily G C. Natures services: societal dependence on natural ecosystems. Washington D C: Island Press, 1997.
- [3] Ehrlich P R, Ehrlich A H. The value of biodiversity. *Ambio*, 1992, 21: 219-226.
- [4] Le Maitre D C, Milton S J, Jarman C. Linking ecosystem services and water resources: Landscape-scale hydrology of the Little Karoo. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(5): 261-270.
- [5] Fu B J, Zhou G Y, Bai Y F, Song C C, Liu J Y, Zhang H Y, Lv Y H, Zheng H, Xie G D. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576.
- [6] Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J B. Ecosystem services and their economic valuation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640.
- [7] Gao W S, Chen Y Q, Dong X B. Signification and measurements for ecological restoration of ecosystem services in Loess plateau. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2003, 17(2): 59-61.
- [ 8 ] Holdren J P, Ehrlich P R. Human population and the global environment. *American Scientist*, 1974, 62: 282-292.
- [ 9 ] Ehrlich P R, Ehrlich A H. *Extinction*. New York: Ballantine, 1981.
- [ 10 ] Constanza R, Arge R, Groot R D, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, Neill R, Paruelo J, Raskin R, Sutton P, Belt M V. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [ 11 ] Alexander A M, List J A, Margolis A, Arge R C. A method for valuing global ecosystem services. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 161-170.
- [ 12 ] Deutsch L, Folke C, Skanberg K. The critical natural capital of ecosystem performance as insurance for human well-being. *Ecological Economics*, 2003, 44(2): 205-217.
- [ 13 ] Maeler K G, Aniyar S, Jansson A. Accounting for ecosystem services as a way to understand the requirements for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9501-9506.
- [ 14 ] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.
- [ 15 ] Chen Z X, Zhang X S. The value of ecosystem service in China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(1): 17-22.
- [ 16 ] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Zheng H, Wan X K, Miao H. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480-491.
- [ 17 ] Yu X X, Lu S W, Jin F. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [ 18 ] Wang Y T, Guo W H, Liu J, Wang S J, Wang Q, Wang R Q. Value of ecosystem services of Kunyu Mountain Natural Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 523-531.
- [ 19 ] Li S M, Xie G D, Zhang C X, Qi Y. Intra-annual dynamics of soil conservation value in forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3482-3490.
- [ 20 ] Wang B, Lu S W, You W Z, Ren X X, Xing Z K, Wang S M. Evaluation of forest ecosystem services value in Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1792-1798.
- [ 21 ] Mo F, Li X Y, He S X, Wang X X. Evaluation of soil and water conservation capacity of different forest types in Dongling Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [ 22 ] Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, Zheng D, Cheng S K. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47-53.
- [ 23 ] Min Q W, Xie G D, Hu D, Shen L, Yan M C. Service valuation of grassland ecosystem in Qinghai Province. *Resource Science*, 2004, 26(3): 56-60.
- [ 24 ] Jiang L P, Qin Z H, Xie W, Wang R J, Xu B, Lu Q. Estimation of grassland ecosystem services value of China using remote sensing data. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 161-170.
- [ 25 ] Sun X Z, Zhou H L, Xie G D. Ecological services and their values of Chinese agroecosystem. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(4): 55-60.
- [ 26 ] Gao W S, Dong X B. Valuation of fragile agriculture ecosystem services in loess hilly-gully region: A case study of Ansai County. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 182-188.
- [ 27 ] Yang Z X, Zheng D W, Wen H. Studies on service value evaluation of agricultural ecosystem in Beijing region. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 564-571.
- [ 28 ] Wu Y, Chang J, Xu B, Peng C, Ge Y. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: A case study in Hangzhou, China. *Ecological Economics*, 2008, 68: 116-125.
- [ 29 ] Liu X H, Lu X G, Jiang M, Shang L N, Wang X G. Research on the valuation of wetland ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5625-5631.
- [ 30 ] Quan W M, Zhang J P, Ping X Y, Shi L Y, Li P J, Chen Y Q. Purification function and ecological services value of *Crassostrea* sp. in Yangtze River estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 871-876.
- [ 31 ] Li W K, Li T H, Qian Z H. Impact of land use change on ecosystem service values in Shenzhen. *Chinese Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 440-446.
- [ 32 ] Xie G D, Xiao Y, Lu C X. Study on ecosystem services: progress, limitation and basic paradigm. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 191-199.
- [ 33 ] Chongqing Municipal Bureau of Statistics. *Chongqing statistical yearbook 2008*. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [ 34 ] Liu C X, Li Y C, Yang H, Min J, Wang C J, Zhang H. RS and GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorge Reservoir area of Chongqing. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 631-642.
- [ 35 ] Li Y C, Liu C X, Wang Y, Zhang H, Wang C J, Min J, Yin M L. The Analysis on the sensitivity of bio-inhabitation in Chongqing. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2009, 26(1): 30-34.
- [ 36 ] Ye Q Y, Yang S H, Lu S G, Yan H Z. The analysis on biodiversity and the sensitivity of bio-inhabitation in Yuxi district. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6): 75-78.
- [ 37 ] Shi P L, Wu B, Cheng G W, Luo J. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze basin. *Journal of*

Natural Resources, 2004, 19 (3): 351-360.

- [38] Chen Y Z. Research on the function of the water conservation and the soil protection of forest in the Three Gorges area, Yangtze River. Beijing Forestry University, 2007: 115-117.
- [39] Liu X Q, Tang W P, Cui H X. A comprehensive evaluation of water conservation capacity of main vegetation types in Danjiangkou reservoir area. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2009, 33 (1): 59-63.
- [40] Meng G T, Fang X J, Li G X, Cai Y, He L P, Zhang Z H, Li N Y. Analysis of water conservation capacity of different vegetation types in Jinshajiang watershed of Yunnan Province. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 (4): 160-163.
- [41] Jia L Q, Ouyang Z Y, Zhao T Q, Wang X K, Xiao Y. The ecological function regionalization of Anhui Province. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (2): 254-260.
- [42] Wang Z J, Li P J, Wan Z C, Wang Y S, Dong L X. Assessment of ecosystem service importance in Liaoning Province. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(10): 1606-1610.
- [43] Tang X H, Wang C J. Assessment of soil erosion sensitivity in Fujian province. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2006, 22(4): 1-4.

#### 参考文献:

- [5] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [6] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [7] 高旺盛, 陈源泉, 董孝斌. 黄土高原生态系统服务功能的重要性与恢复对策探讨. 水土保持学报, 2003, 17(2): 59-61.
- [14] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [15] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.
- [16] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [17] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳. 中国森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2005, 25 (8): 2096-2102.
- [18] 王玉涛, 郭卫华, 刘建, 王淑军, 王琦, 王仁卿. 昆崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2009, 29(1): 523-531.
- [19] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 祁悦. 森林生态系统土壤保持价值的年内动态. 生态学报, 2010, 30(13): 3482-3490.
- [20] 王兵, 鲁绍伟, 尤文忠, 任晓旭, 邢兆凯, 王世明. 辽宁省森林生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1792-1798.
- [21] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 王晓学. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [22] 谢高地, 张德强, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [23] 闵庆文, 谢高地, 胡昉, 沈镭, 严茂超. 青海草地生态系统服务功能的价值评估. 资源科学, 2004, 26(3): 56-60.
- [24] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 王瑞杰, 徐斌, 卢琦. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究. 自然资源学报, 2007, 22(2): 161-170.
- [25] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. 中国人口资源与环境, 2007, 17(4): 55-60.
- [26] 高旺盛, 董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例. 自然资源学报, 2003, 18(2): 182-188.
- [27] 杨志新, 郑大玮, 文化. 北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究. 自然资源学报, 2005, 20(4): 564-571.
- [29] 刘晓辉, 吕宪国, 姜明, 商丽娜, 王锡刚. 湿地生态系统服务功能的价值评估. 生态学报, 2008, 28(11): 5625-5631.
- [30] 全为民, 张锦平, 平仙隐, 施利燕, 李培军, 陈亚瞿. 巨牡蛎对长江口环境的净化功能及其生态服务价值. 应用生态学报, 2007, 18(4): 871-876.
- [31] 李文楷, 李天宏, 钱征寒. 深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响. 自然资源学报, 2008, 23(3): 440-446.
- [32] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. 植物生态学报, 2006, 30(2): 191-199.
- [33] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴(2010). 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [34] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 闵婕, 王才军, 张虹. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价. 地理学报, 2011, 66(5): 631-642.
- [35] 李月臣, 刘春霞, 汪洋, 张虹, 王才军, 闵婕, 殷名莉. 重庆市生境敏感性评价研究. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 30-34.
- [36] 叶其炎, 杨树华, 陆树刚, 闫海忠. 玉溪地区生物多样性及其生境敏感性分析. 水土保持研究, 2006, 13(6): 75-78.
- [37] 石培礼, 吴波, 程根伟, 罗辑. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究. 自然资源学报, 2004, 19 (3): 351-360.
- [38] 陈引珍. 三峡库区森林植被水源涵养及其保土功能研究. 北京林业大学, 2007: 115-117.
- [39] 刘学全, 唐万鹏, 崔鸿侠. 丹江口库区主要植被类型水源涵养功能综合评价. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33 (1): 59-63.
- [40] 孟广涛, 方向京, 李贵祥, 柴勇, 和丽萍, 张正海, 李宁云. 云南金沙江流域不同植被类型水源涵养能力分析. 水土保持研究, 2007, 14 (4): 160-163.
- [41] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 肖焱, 肖荣波, 郑华. 安徽省生态功能区划研究. 生态学报, 2005, 25(2): 254-260.
- [42] 王治江, 李培军, 万忠成, 王延松, 董丽新, 陈大光. 辽宁省生态系统服务重要性评价. 生态学报, 2007, 26(10): 1606-1610.
- [43] 汤小华, 王春菊. 福建省土壤侵蚀敏感性评价. 福建师范大学学报(自然科学版), 2006, 22(4): 1-4.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.1 January, 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Integrating ecological civilization into social-economic development ..... WANG Rusong ( 1 )
- The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: a review .....  
..... GAO Guangyao, FU Bojie, LÜ Yihe, et al ( 12 )
- The status and trend on the urban tree canopy research ..... JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa, et al ( 23 )
- Bioindicators and Biomonitoring in Environmental Quality Assessment .....  
..... Bernd Markert, WANG Mei'e, Simone Wünschmann, et al ( 33 )
- Electron transfer capacities of dissolved organic matter and its ecological effects ... BI Ran, ZHOU Shungui, YUAN Tian, et al ( 45 )

### Autecology & Fundamentals

- Antioxidative responses of *Abies fabri* seedlings to litter addition and temperature elevation .....  
..... YANG Yang, YANG Yan, WANG Genxu, et al ( 53 )
- Effects of seed soaking with different concentrations of 5-aminolevulinic acid on the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*)  
seeds under NaCl stress ..... ZHAO Yanyan, HU Xiaohui, ZOU Zhirong, et al ( 62 )
- Influence of magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence characteristic in leaves of Newhall navel orange .....  
..... LING Lili, PENG Liangzhi, WANG Nanqi, et al ( 71 )
- Leaf traits of 66 herbaceous species in Songnen grassland in Northeast China .....  
..... SONG Yantao, ZHOU Daowei, WANG Ping, et al ( 79 )
- Effects of nectar secondary compounds on pollination of co-flowering species in a natural community .....  
..... ZHAO Guangyin, LI Jianjun, GAO Jie ( 89 )
- The continuous life-table of *Leptocybe invasa* ..... ZHU Fangli, QIU Baoli, REN Shunxiang ( 97 )

### Population, Community and Ecosystem

- Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds .....  
..... YIN Xiaojie, ZHOU Guangsheng, SUI Xinghua, et al ( 103 )
- Fruit diet, Selectivity and Seed dispersal of Hatinh langur (*Trachypithecus francoisi hatinhensis*) .....  
..... Nguyen Haiha, BAI Bing, LI Ning, et al ( 110 )
- The distribution of living coccolithophore in East China Sea in autumn, 2010 ..... JIN Shaofei, SUN Jun, LIU Zhiliang ( 120 )
- The association of OPRK1 gene SNP with sika deer (*Cervus nippon*) diurnal behavior traits .....  
..... LÜ Shenjin, YANG Yan, WEI Wanhong ( 132 )
- Preliminary study on bird composition and diversity in Poyang Lake watershed during non-breeding period .....  
..... SHAO Mingqin, ZENG Binbin, XU Xianzhu, et al ( 140 )
- Coexistence mechanism of two species passerines in man-made nest boxes ..... LI Le, ZHANG Lei, YIN Jiangxia, et al ( 150 )
- Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters .....  
..... LI Yanhong, YANG Wanqin, LUO Chengde, et al ( 159 )
- RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) .....  
..... LI Yuechen, LIU Chunxia, MIN Jie, et al ( 168 )

### Landscape, Regional and Global Ecology

- The distribution of soil organic carbon as affected by landforms in a small watershed of gully region of the Loess Plateau .....  
..... LI Linhai, GAO Erhu, MENG Meng, et al ( 179 )
- Effects of coastal geographical characteristics on the abundance of submerged aquatic vegetation .....  
..... WU Mingli, LI Xuyong, CHEN Nianlai ( 188 )
- Analysis of soil physical properties under different vegetation types in the alluvial fan area of Manas River watershed .....  
..... CAO Guodong, CHEN Jiehua, XIA Jun, et al ( 195 )

### Resource and Industrial Ecology

- Effects of farming on wetland soil seed banks in the Sanjing Plain and wetland restoration potential .....  
..... WANG Guodong, Beth A Middleton, LÜ Xianguo, et al ( 205 )

Effects of the microhabitats on the seedling emergence during the flooding disturbance .....	
.....	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (214)
Analysis on the limiting factors to further improve yield of summer maize in Heilonggang River Valley .....	
.....	XU Lina, TAO Hongbin, HUANG Shoubing, et al (222)
Fungal diversity in rhizosphere soil of medicinal plants in Heilongjiang Province .....	
.....	MU Dongyan, LÜ Guozhong, SUN Xiaodong, et al (229)
Integrated assessment of mariculture ecosystem health in Sanggou Bay .....	FU Mingzhu, PU Xinming, WANG Zongling, et al (238)
<b>Urban, Rural and Social Ecology</b>	
The integrative assessment on ecological quality status of Luoyuan Bay based on ‘OOAO principle’ .....	
.....	WU Haiyan, WU Yaojian, CHEN Keliang, et al (249)
Trophic state of seawater and ecological characteristics of phytoplankton in Sishili Bay .....	
.....	LI Bin, BAI Yanyan, XING Hongyan, et al (260)
Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model .....	FANG Kai (267)
Landscape dynamics of medium- and small-sized cities in eastern and western China: a comparative study of pattern and driving forces .....	QI Yang, WU Jianguo, LI Jianlong, et al (275)
<b>Research Notes</b>	
Prediction of bacterial species richness in the South China Sea slope sediments .....	LI Tao, WANG Peng (286)
Spatial pattern of seedling regeneration of <i>Ulmus pumila</i> woodland in the Otindag Sandland .....	
.....	LIU Zhen, DONG Zhi, LI Hongli, et al (294)
Impacts on seed germination features of <i>Eupatorium adenophorum</i> from variable light stimulation and traditional dormancy-broken methods .....	JIANG Yong, LI Yanhong, WANG Wenjie, et al (302)
<b>Opinions</b>	
Discus for classification of plant association .....	XING Shaohua, YU Mengfan, YANG Lijuan, et al (310)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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 33 卷 第 1 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 1 (January, 2013)

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

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元