

# 西南岩溶地区地下水污染及防治途径

张军以<sup>1,2</sup>, 王腊春<sup>1</sup>, 马小雪<sup>1</sup>, 张丽<sup>1</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018)

**摘要:** 岩溶地下水资源是西南岩溶山区最重要的生活生产用水来源,也是西南岩溶地区实现社会经济与生态建设全面可持续发展的重要保障。在分析西南岩溶山区地下水资源开发利用状况的基础上,对西南岩溶地区地下水污染现状及特点进行了调查分析。结果显示,西南岩溶地区地下水污染源主要来自城市经济活动、工矿开采及“三废”排放、农业生产面源污染、农村生活垃圾污染 4 个方面。提出了加强岩溶地区地下水调查及定位监测;加强水环境保护的宣传教育,提高村民水环境保护意识;调整产业结构,推进农村垃圾集中处理;发展有机生态农业;推进农村生态环境综合治理及地下水污染治理技术攻关等相应的防治与调控对策,认为防治岩溶地下水污染的关键在于预防。

**关键词:** 岩溶地区; 地下水污染; 防治

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)02-0245-05

中图分类号: P933

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.051

## Groundwater Pollution and Controlling Measures in Karst Mountainous Areas of Southwestern China

ZHANG Jun-yi<sup>1,2</sup>, WANG La-chun<sup>1</sup>, MA Xiao-xue<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>

(1. School of Geographic & Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. Geography and Tourism Department, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550018, China)

**Abstract:** Groundwater resources are the most important source to life and industrial water use in Southwest China karst-mountains and provide an important guarantee for the all-side sustainable development of social, economic and ecological construction. The present status and characteristics of groundwater pollution were analyzed based on the analysis of groundwater resources use in Southwest China karst-mountains. Results indicate that the groundwater pollution in Southwest China karst-mountains mainly comes from four aspects: urban economic activities, industrial and mining exploitation, the “three wastes” emission, agricultural non-point source pollution and rural living garbage pollution. On this basis, several measures were discussed and put forward: strengthening investigation and monitoring of groundwater in karst region; strengthening water environmental protection publicity and education and improving villagers’ water environmental protection consciousness; adjusting industrial structure and promoting rural waste treatment; developing organic ecological agriculture; and promoting the prevention and controlling countermeasures of rural ecological environment and groundwater pollution controlling. Prevention is recognized to be the key to control karst groundwater pollution.

**Keywords:** karst region; groundwater pollution; prevention and control

我国西南岩溶区地处亚热带暖湿—温湿季风气候区,同时受西南及东南季风的影响,降水丰富,石灰岩等碳酸盐岩分布广泛,可溶岩分布面积达  $1.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,出露面积  $7.80 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,西南岩溶石山地区面积约  $6.20 \times 10^5 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>,主要集中在滇、黔、

桂等省份。该区域也是我国珠江、长江及元江等河流上游重要的生态屏障区,生态地位重要。区内岩溶作用强烈,裂隙、溶隙、落水洞发育强烈,地表水与地下水交换迅速,地表渗漏严重。降水入渗补给系数达  $0.4 \sim 0.8$ ,比北方地区高出  $0.3 \sim 0.5$ <sup>[2]</sup>。加之区内

收稿日期:2013-05-30

修回日期:2013-06-12

资助项目:国家自然科学基金项目“喀斯特地区人类主导下的生态环境变化与流域水文循环响应耦合机理研究”(41371045);“贵州喀斯特区城市边缘带土地利用/覆盖变化及其环境效应研究”(41261038);国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ25B09)

作者简介:张军以(1985—),男(汉族),山东省沂南县人,博士研究生,研究方向为水文水资源、区域可持续发展与生态环境。E-mail: hellojunyi@yeah.net。

通信作者:王腊春(1963—),男(汉族),江苏省金坛县人,教授,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:wang6312@263.net.cn。

水土流失、石漠化等环境问题造成的地表植被减少,地表涵养水源能力较弱,地表水难以储存,易出现“工程型”缺水等用水安全问题。2010 年仅滇桂黔石漠化地区中的广西片区就有 325.4 万农村人口存在饮水安全问题;云南片区有 36.6 万户约 150 万人饮水不安全;贵州省同年饮水不安全人口达 1 016 万,其中超过 500 万人分布在滇桂黔岩溶片区的贵州石漠化片区<sup>[3]</sup>。强烈岩溶作用形成的地表地下二元三维储水结构,成为优良的储水体,造成地表水缺乏,而地下水丰富。此外,岩溶地下水资源可采资源量及开采潜力大,但由于岩溶地区地形地貌破碎、地表土壤层相对较薄且分布异质性高,相对于东部平原地区,岩溶地区常缺少天然防渗或过滤层,地表水和地表污染物很容易通过裂隙、落水洞等直接进入地下含水层或地下河,造成岩溶地下水污染。因此,本研究通过对西南岩溶地区地下水污染现状及特点进行深入分析的基础上,探讨了西南岩溶地区地下水污染的防治对策。

## 1 西南岩溶地下水资源及开发利用概况

我国西南岩溶山区涵盖广西、贵州、云南、广东、湖南、湖北、四川及重庆 8 省(市、区),位于  $100^{\circ}34' - 114^{\circ}10'E, 22^{\circ}00' - 30^{\circ}04'N$  之间,东西 1 380 km,南北 1 010 km,覆盖部分珠江流域及长江流域,总面积约  $7.60 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。现已探明地下水天然资源量为  $1.76 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$ ,允许开采量为  $6.21 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,已开采量为  $9.03 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,总体开采利用率为 14.54%,剩余资源潜力为  $5.31 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中长江流域  $2.50 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,珠江流域  $2.57 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,国际诸河(元江流域)  $2.44 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[4]</sup>。可见西南岩溶山区地下水资源丰富,开发利用潜力巨大。此外,岩溶山区发育的地下河是优良的地下水水源,易于开发利用,成本相对较低且水质较好。我国南方主要岩溶地区,已知 3 358 条岩溶地下河系统,仅枯季流量就达  $4.20 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,目前仅开发利用 8%~15%<sup>[5]</sup>,剩余开发利用潜力巨大。在滇、黔、桂岩溶分布密集区,地下水总允许开采量  $3.06 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中云南省开采利用率较高,已开采利用  $3.61 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,占总可开采总量的 33.94%。贵州及广西两省利用率较低,仅为 11.54% 及 6.87%。而作为滇、黔、桂三省岩溶山区地下水开采利用率最高的云南省,2011 年水资源公报显示该省河道外供水量  $1.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,其中地表水资源供水量占 96%,地下水仅占 3%,地下水占供水总量的比重严重偏低。总体上,西南岩溶山区地下水资源丰富,但目前开发利用水平较低,有待于进一步的开发利用。

## 2 西南岩溶地下水污染现状及特点

西南岩溶地下水污染主要以人为污染为主,且人类活动导致的生态环境问题已造成地下水资源减少。据广西、云南、湘西、贵州等省区实测资料显示,从 20 世纪 80 年代至今,地下水资源约减少了 10%,而同期的降水量没有明显变化,主要是由人类经济活动、砍伐森林、开荒种地所致。西南地区地形崎岖破碎,平坝耕地稀少,生态环境脆弱,石漠化严重,人地矛盾尖锐,如我国岩溶地貌分布集中的云南、贵州、广西 3 省石漠化面积达  $88 091.7 \text{ km}^2$ ,其中重度石漠化面积就占 25.8%,达  $22 719.81 \text{ km}^2$ 。同时,2011 年 3 省平均人口密度 158 人/ $\text{km}^2$ ,比同期全国平均人口密度高出 18 人,但 3 省人均 GDP 20 228 元,仅为同期全国平均水平的 57.7%<sup>[6-9]</sup>,社会经济正处于工业化快速发展阶段,人类活动对生态环境的影响强度不断增强。脆弱的自然生态环境条件,加之强烈的人类活动势必对区域地下水水环境造成严重影响,不合理的排污活动导致地下水资源的严重污染乃至水环境的恶化。

### 2.1 以城市为中心,污染物质趋于复杂

西南岩溶山区社会经济发展相对落后,随着国家西部大开发的深入推进,社会经济发展水平迅速提高,尤其是工业化进程较快的省会及各级中心城市。经济的迅速发展,城市规模及人口迅猛增长,对资源的消耗急剧增加,如贵州省能源消费总量由 2006 年的  $5.58 \times 10^7 \text{ t}$  标准煤增加到 2011 年的  $8.36 \times 10^7 \text{ t}$  标准煤,年均增长 10%,且能源结构不合理,污染较大的原煤占能源消耗比重的 48.8%,天然气仅占 0.6%<sup>[8]</sup>。同时城市发展产生的各类生活生产污水、垃圾的不合理排放也造成了地下水的严重污染,尤其是在中小城市废水及垃圾处理率低,大量生活垃圾不经处理无序堆放,垃圾发酵产生的浸出液含有多种剧毒物质,对地下水环境造成严重污染,并直接影响到人体健康,如重庆市彭水县垃圾无序堆放导致地下河水体中的优先控制污染物 PAEs(邻苯二甲酸酯类)浓度高达 233.5 ng/L,高致癌物质 PAHs(多环芳烃)浓度为 51.4 ng/L<sup>[10]</sup>,表明地下河正在遭受垃圾渗滤液的严重污染,且污染物质趋于复杂多样化。

### 2.2 工矿开采及“三废”污染严重

西南地区是我国有色金属资源分布集中区,有色金属资源丰富,如云南省个旧市的锡矿、东川区的铜矿及钛矿等,有“有色金属王国”之称;广西省钨金属储量世界第一,有“有色金属之乡”的美誉。在优势矿产资源开采及深加工过程中,企业往往注重短期经济

效益,忽视生态环境效益,不注重排污处理或要求不严格,造成大量有害物质(废水、废气、废渣浸出液)通过地表裂隙等迅速渗透到地下,造成地下水严重污染。如广西省凤山县的金牙金矿,因废弃尾矿坝的砷、硫污染,已造成金牙乡 1 000 余人砷中毒及稻田减产,并影响到下游石马湖水库与三门海地下河。取样检测结果显示,金牙金矿尾矿坝渗水砷含量近 0.4 mg/L,高于饮用水许可标准含量 70 多倍<sup>[10]</sup>;广西省黑水河流域的锰矿开发,同样对流域地下水造成严重污染,导致位于地下河出口的湖润镇水厂,锰含量超标约 59 倍<sup>[10]</sup>。由于地表水的相对缺乏,地下水已逐渐成为西南岩溶地区农村及城市重要的饮用水水源,若不能对污染源进行有效控制及治理,将使地下水水质恶化,对人体健康造成威胁,易导致区域大面积重金属中毒事件的发生。

### 2.3 农业生产的面源污染导致地下水污染范围广

西南岩溶地区由于成土母质的特殊性,成土速率极低,生成厚度 1 cm 的土壤约需 2 000~3 000 a 以上<sup>[11]</sup>,且土层分布不连续,土壤贫瘠。而西南岩溶地区城乡二元结构突出,农村人口比重大,农民在农业生产中为获得稳定的收成,大量使用化肥及农药。如贵州省 2011 年化肥及农药使用量分别为 535.95 和 8.24 kg/hm<sup>2</sup>,其中化肥使用量高出同期全国平均使用量 184.45 kg/hm<sup>2</sup>(全国平均 351.50 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[8]</sup>,比全国平均水平高出 52.48%。此外,地形破碎、耕地分布零散,造成大面积的地下水污染。研究表明,高强度的土地利用可导致地下水水质恶化<sup>[12]</sup>,地下水水质污染分布与土地利用格局分布具有一致性<sup>[13]</sup>。西南岩溶山区由于表层储水介质的孔隙率、裂隙率高,降水入渗透率比北方地区高 0.3~0.5<sup>[2]</sup>,如广西省弄拉等地的表层岩溶带裂隙率达 60%,降雨入渗系数可达 0.7<sup>[14]</sup>,而山东土门岩溶区的降水入渗系数仅为 0.3<sup>[14]</sup>。加之地表土壤层较薄,甚至缺乏土壤等过滤层,化肥、农药及农家肥的不合理使用,遇降水极易下渗进入地下水环境,造成地下水环境污染。同时,在不同复种指数农作区(低复种指数到高复种指数)的研究显示,随着复种指数的提高,浅层地下水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、高锰酸钾指数及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量依次增大,呈上升趋势<sup>[15]</sup>。整体上,高强度的耕地利用差异和耕地分布的分散增加了对地下水污染的影响范围,易造成大面积的地下水污染。

### 2.4 农村生活垃圾污染

岩溶山区环境相对闭塞,社会经济发展水平低,农村生活垃圾一般不经处理随意堆放,村寨粪土,垃圾乱倒,污水乱泼,畜禽乱跑等现象突出。据 2006—

2007 年全国农村饮用水与环境卫生调查数据显示,全国农村人均日生活性垃圾量为 0.86 kg,人均日生产性垃圾量为 2.03 kg<sup>[16]</sup>。考虑到西南岩溶地区农村社会经济发展水平较低,人均垃圾产生量低于全国平均水平,按其人均 GDP 占全国平均水平的比重(57.7%)计算人均生活、生产性垃圾产生量,分别为 0.50 和 1.71 kg/d。仅岩溶面积分布最集中的云南、贵州、广西三省 2011 年农村人口 7 886 万人(农村人口按 2012 年中国统计年鉴中城镇与乡村统计区分)<sup>[9]</sup>计算,日均产生生活性垃圾 39 430 t,生产性垃圾 134 850.6 t,乡村垃圾处理率极低,几乎全部以随意排放的方式进入到岩溶环境中。同时,随着农村经济发展水平的提高,农村垃圾向复杂化、城市化发展趋势显著,已由传统的易腐烂降解为主发展为以难降解的有毒有害垃圾为主。垃圾主要由传统的可降解有机物类(瓜皮、杂草、废布/纸等)转化为以难降解的化学废弃物(塑料薄膜、废弃电池、化学纤维等),种类及成分日趋复杂多样化,对环境污染日益严重。此外,更为严重的是岩溶山区农民往往将生活垃圾、动物尸体等直接丢弃到地下河天窗,垃圾在地下河道浸泡、发酵,尤其是废旧电池、农兽药残留等对地下河水体造成严重污染,严重威胁到岩溶地下洞腔系统中的生物多样性及区域居民的身体健康。

## 3 岩溶地下水污染防治调控途径

### 3.1 加强岩溶地区地下水调查研究力度及定位监测

西南岩溶地区岩溶作用强烈,地下岩溶地貌发育良好,地下河分布广泛。但目前大部分地下河情况不清,资源不明,部分在未开发利用时已受到严重污染。因此,应加大对西南岩溶地区地下水资源调查,掌握西南岩溶地区主要地下河系统的水文流域汇水面积、排泄区域及流域社会经济发展状况、农业发展模式等,开展岩溶地下水环境脆弱性调查评价,摸清重要流域的主要工业污染源、生活污染源、农业污染源,包括各类污染源的主要污染物、年排放量、污染物的传输扩散途径等,为将来划定合理的流域治理及保护规划提供科学依据。同时,在位于重要中心城市饮用水水源地、人口密集的粮食主产区的主要地表河、地下河水源地水质进行定位观测,建设西南岩溶地区地下水水质与环境地质信息监测系统,及时掌握相关水资源水质、水量变化情况,确保区域生产生活用水安全。

### 3.2 加强保护地下河、地下水水环境的教育宣传,提高村民水环境保护意识

西南岩溶地区尤其是岩溶山区社会经济落后,农民受教育程度普遍不高,如贵州省人均受教育程度仅

7.41 a, 低于全国平均水平 1.64 a<sup>[3]</sup>。乡村村民对生态环境保护意识普遍不高,尤其是村民对岩溶地下水环境的认识更加不足,对“看不见”的岩溶地下水环境的认知及保护意识淡薄,导致农村生活垃圾随意倾倒在落水洞、地下河天窗等。因此,应加强宣传,通过印制图文并茂的展板、图书资料等各类形式的宣传教育材料,使村民能直观地认识到岩溶地下水环境的重要性及自身不合理活动对岩溶地下水造成的污染和破坏,进一步让村民了解认识到岩溶地下水环境污染破坏后,对自身身体健康及生产生活的影响,增强村民约束自我行为的意识及保护地下水环境的迫切性。

### 3.3 调整产业结构,关停岩溶地区重污染企业及推进农村垃圾集中处理

西南地区经济发展正处于工业化的初中期阶段,制造业内部构成由轻型工业的迅速增长转向以重型工业的迅速增长为主的发展阶段,如云、贵、川、桂4省三大产业结构中,第二产业平均比重为46.4%<sup>[6-8]</sup>,与全国平均水平持平。要改变传统工业化高能耗、高污染的路子,尤其要改变西南地区低水平粗放式开采有色金属矿产资源的现状,政府应利用用地审批、税收、金融等方面的政策倾斜,通过市场机制推进循环型、节约型经济的发展,进一步优化产业结构。在企业排污方面,强化监督管理,严禁不达标排放及使用渗井、渗坑排放等,实现排污沟渠硬化,防止污染渗漏,严格控制污染源。岩溶地下水污染存在治理困难、成本极高且周期长等特点,要坚持“预防为主,治理为辅”的原则,从源头上防治地下水的污染。同时,在西南岩溶地区地下水水环境的特殊背景下,以“生态效应优先,兼顾经济效益”的原则,坚决关停淘汰一批落后的重污染型工业企业及生产工艺,加速产业升级换代,对部分污染严重的产业进行限期整改或升级。此外,西南地区城市化水平低且落后于工业化发展进程,主要由于工业结构对劳动力的吸纳能力不足,因此政府应有计划地加快推进城镇化进程,加快农村居民点聚居建设,推进乡村小城镇化进程,建立集中的城镇及农村垃圾处理设施,提高垃圾处理率,减少农村垃圾对岩溶地下水环境的污染。

### 3.4 大力发展有机生态农业,减少化肥农药对地下水的污染

岩溶地区地表水地下水交换迅速且缺乏土壤等有效过滤层,传统农业大量使用化肥农药,极易随降水进入地下管网系统,不仅造成化肥等使用效益的降低且造成地下水的污染。研究表明,岩溶地区随着土地利用方式的变化,地下水质量也出现一定程度的下降,如林地转变为耕地<sup>[17]</sup>。贾亚男<sup>[13]</sup>等对贵州省水

城盆地1980—2003年20a多间岩溶水水质的研究表明,地下水水质污染区分布与土地利用分布具有一致性。因此,岩溶地区适宜大力发展无公害的有机生态农业,减少化肥农药的使用量。此外,要对农田渠道进行硬化处理,减少渗漏。

### 3.5 农村生态环境进行综合治理及地下水污染治理技术攻关

岩溶山区农村存在生活垃圾、废水随意堆放、排放的现状。应以国家新农村建设为契机,对村寨新建房屋进行统一规划,修建统一的污水排放渠道,建设村寨污水沟渠及统一处理点、垃圾固定存放点,并提高沟渠防渗标准。针对人畜粪便的污染,进行无害化卫生厕所改造,并推进农村沼气工程建设,变废为宝。沼气满足农户生活能源需要,沼渣/液用来肥田,不仅易于农作物吸收,且减少营养元素的流失,促进资源的高效利用,减少对地下水的污染。同时,地下水污染治理技术一直是水污染治理领域的难题之一,缺少成熟可供推广的技术模式。岩溶地区地表水与地下水交换迅速,岩溶作用强烈且地表土壤等过滤层相对缺失,地下水易受到地表污染物的直接污染,应根据岩溶地区水环境的特殊性,有针对性地进行投入,对岩溶地下水污染治理相关技术手段及技术体系进行攻关研究。如地下水污染的风险评价及检测,地下水污染的数值模拟,污染物的扩散迁移途径,地下水污染的同位素研究等关键技术。

## 4 结论

西南岩溶地区的水资源保护不仅关系到区域生态环境建设,更关系到社会经济的可持续发展,同时作为我国长江、珠江两大水系的上游汇流地区,水环境、水资源的保护对保证下游生产生活用水安全具有重要的意义。岩溶地区特殊的地表地下“二元三维”储水结构及发达的管网系统,使地表水与地下水交换迅速,易导致地表水缺乏,出现干旱及“工程型”缺水,并且污染源更易扩散,增加了治理难度,使地下水污染不同于一般平原地区,监测治理难度更大。岩溶含水体内裂隙、溶隙水,若无管网与相邻地下水存在水力联系,其自身更新速度较慢,污染在短时间内难以恢复,增加了治理难度。另一方面,深入推进岩溶地区针对水土流失、石漠化、森林退化等生态环境问题的生态修复工程建设,对提高岩溶地区涵养水源、保水固土能力具有重要作用,有利于提高山区水资源的可持续利用。此外,在当前岩溶地下水开发利用技术不成熟,开发利用存在一定难度的情况下,部分岩溶地下水已出现较严重的污染,因此要以“保护优先,适度

开发”为原则,加大对岩溶地区重要流域的水量水质监测及保护,可考虑通过适当生态移民,划定部分重要岩溶地区为水源保护区,实行严格保护。

致谢:本文引用了国土资源部中国地质调查局“西南岩溶石山地区地下水与环境地质调查”计划项目成果“西南岩溶石山地区地下水勘查与生态环境地质调查评价报告”的部分数据资料,特此说明并表示感谢。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郑万模,魏伦武.西南岩溶石山区地下水资源勘查与生态环境地质调查技术方法的探讨[J].水文地质工程地质,2001,28(5):48-50.
- [2] 肖长来,王秀娟,王彪,等.水文地质学[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [3] 苏维词.滇桂黔石漠化集中连片特困区开发式扶贫的模式与长效机制[J].贵州科学,2012,30(4):1-5.
- [4] 国土资源部中国地质调查局.西南岩溶石山地区地下水资源勘查及生态环境地质调查评价报告[EB/OL].(20071212)[20130506].<http://water.cgs.gov.cn/web/xmbg/200712/893.html>.2007.
- [5] 卢耀如,张凤娥,刘长礼,等.中国典型地区岩溶水及其生态水文特性[J].地球学报,2006,27(5):393-402.
- [6] 云南省统计局.云南省统计年鉴 2012 年[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [7] 广西省统计局.广西省统计年鉴 2012 年[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [8] 贵州省统计局.贵州省统计年鉴 2012 年[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [9] 国家统计局.中国统计年鉴 2012 年[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [10] 李晓明.西南岩溶区地下水环境告急[N].科学时报,2009-02-19(1).
- [11] 彭晚霞,王克林,宋同清,等.喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J].生态学报,2008,28(2):811-820.
- [12] 贾亚男,袁道先,何多兴.桂林东区土地利用变化对浅层岩溶地下水质的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2006,31(4):167-171.
- [13] 贾亚男,袁道先.土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J].地理学报,2003,58(6):831-838.
- [14] 蒋忠诚,王瑞江,裴建国,等.我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J].中国岩溶,2001,20(2):106-110.
- [15] 廖婧琳,苏跃,李航,等.喀斯特山区不同农作方式下土壤质量变化对浅层地下水质量的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(12):2351-2356.
- [16] 姚伟,曲晓光,李洪兴,等.我国农村垃圾产生量及垃圾收集处理现状[J].环境与健康杂志,2009,26(1):10-12.
- [17] 苏跃,刘方,李航,等.喀斯特山区不同土地利用方式下土壤质量变化及其对水环境的影响[J].水土保持学报,2008,22(1):65-68.
- [5] 陈百明,张凤荣.中国土地可持续利用指标体系的理论与方法[J].自然资源学报,2001,16(3):197-203.
- [6] 李栓,丁冠华.基于 DEA 的哈尔滨市土地利用经济效益评价[J].中国人口·资源与环境,2010,20(3):329-333.
- [7] 彭建,蒋依依,李正国,等.快速城市化地区土地利用效益评价:以南京市江宁区为例[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):4-6.
- [8] 秦伟山,廖和平,张春柱,等.县域土地利用协调度研究:以重庆市璧山县为例[J].中国农学通报,2010,26(19):344-348.
- [9] 方琳娜,陈印军,宋金平.城市边缘区土地利用效益评价研究:以北京市大兴区为例[J].中国农学通报,2013,29(8):154-159.
- [10] 王凯,王丽,黄云.土地资源利用变化的效益评价研究:以重庆市万州区为例[J].中国农业资源与区划,2006,27(1):30-34.
- [11] 李新举,赵庚星,李宪文,等.泰安市土地利用可持续评价[J].中国土地科学,2004,18(3):27-34.
- [12] 张忠根,应凤其.农业可持续发展评估:理论、方法与应用[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [13] 刘岩.土地利用规划与土地资源的可持续利用[J].辽宁师范大学学报,1999,22(2):167-170.
- [14] 刘秀华,邵景安,陈务魁.县级土地利用规划的理论与实践[M].重庆:西南师范大学出版社,2004.
- [15] 张娜,雷国平.黑龙江省土地利用经济效益评价[J].国土资源情报,2009(1):46-49.

(上接第 244 页)