

桂林寨底地下河农业系统氮流失估算

谢运球¹, 玉 宏², 裴建国¹, 陈 羽³

(1.国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2.柳州市第三中学, 广西 柳州 545006; 3.贵港市高级中学, 广西 贵港 537000)

摘 要:为评价岩溶区面源污染对漓江的影响,通过对地下径流、氨挥发和农产品等途径输出氮的计算,估算了桂林寨底地下河农业系统氮流失量。结果表明,寨底地下河农业系统年流失氮 1.03×10^5 kg,其中地下河水土流失损失氮 4.37×10^4 kg,氨挥发逸失氮 3.91×10^4 kg,农产品输出氮 2.06×10^4 kg。随地下河水流失的溶解态氮为 2.62×10^4 kg,且其中 99% 为硝态氮,比 30 年前增加了约 8 倍,而泥沙吸附态氮为 1.75×10^4 kg;地下河水土流失损失氮 90% 以上出现在雨季,且上半年以化肥源氮为主。受石灰土酸碱度的影响,56.5% 氨挥发主要发生在稻田。鲜桃输出了农产品中 39.8% 的氮,这是系统内大力发展桃种植产业的结果。该系统流失氮的 80% 最终以水溶态、气态进入地表水和大气环境,因而加剧了漓江的环境压力。

关键词:寨底地下河;氮流失;硝酸盐;氨挥发

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)10-1979-06 doi:10.11654/jaes.2015.10.020

Nitrogen Losses of Zhaidi Underground River Agricultural System in Eastern Guilin

XIE Yun-qiu¹, YU Hong², PEI Jian-guo¹, CHEN Yu³

(1.Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Rehabilitation, MLR & Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China; 2.The Third Middle School of Liuzhou, Liuzhou 545006, China; 3.High School of Guigang, Guigang 537000, China)

Abstract: In order to evaluate non-point pollution of agriculture in karstic area, nitrogen losses via subterranean runoff, ammonia volatilization and farm product exports were estimated in Zhaidi karst underground river agricultural systems in Lijiang River watershed situated in Guilin City, Guangxi Zhuang Autonomous Region. Results showed that 1.03×10^5 kg of nitrogen was lost every year in Zhaidi karst underground river agricultural ecosystem. Of which 4.37×10^4 kg N was removed through soil and water loss of underground river, 3.91×10^4 kg N escaped by ammonia volatilization, and 2.06×10^4 kg N output as farm products. Soluble N, with 99% of NO_3^- -N, amounted to 2.62×10^4 kg, 8 times more than 30 years ago. Sediment-adsorbed N was 1.75×10^4 kg. More than 90% of N losses via water and soil occurred in rainy days, which was mostly caused by chemical fertilizer N in the first half year and by the excreta of animal and human (including manure) or sewage mixed with dung in the second half year. Fresh peach fruits exported 39.8% of N outputs of agricultural produce. Rice field contributed to 56.5% of ammonia volatilization, which was caused by high pH of calcareous soil. Therefore, about 80% of lost N in Zhaidi karst underground river agricultural system entered into surface water and atmospheric environment through water-soluble and gaseous forms, increasing environmental pressure on the Lijiang River.

Keywords: Zhaidi underground river; N loss; nitrate; ammonia volatilization

收稿日期:2015-04-17

基金项目:国家科技支撑项目之课题“漓江流域面源污染控制与水土流失治理技术研究和示范”(2012BAC16B02);中国地质调查局项目“西南岩溶地下水污染调查评价”(1212011121164);广西自然科学基金项目“典型岩溶坡面土壤渗流水的氮磷特征及其环境响应”(2013GXNSFBA019220)

作者简介:谢运球(1964—),男,博士,研究员,研究方向为农业地质、岩溶环境与资源、水土保持、生态农业等。E-mail:yqxie@karst.ac.cn

人口的增长、生活水平的提高推动了农业产业结构从曾经单一的以粮为主到粮果复合种植再到种养结合的变革,改变了农业生态系统氮素循环,增加了环境的氮负荷,带来了全球性的生态环境问题^[1]。山东小清河流域上游地区,畜禽养殖产生了整个流域 58% 的粪便量,氮素污染负荷高于欧盟的最高限制标准 ($250 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$),极大地影响了其水体环境^[2]。海河流域^[3]畜禽养殖贡献了 81% 的农业面源污染,其次为农村生活污水 (15.7%) 和种植业 (3.3%)。从氮的形态来说,运用土壤流失方程与 GIS 技术研究了大流域尺度和跨流域的行政区域流失的泥沙吸附态氮^[4-6],获得了农田、高盖度天然林地等不同土地利用类型影响硝态氮与铵态氮、泥沙吸附态氮的认识^[7-8]。

岩溶区农业生态系统因其特殊的水文、岩土结构表现出环境脆弱性^[9],对氮素流失的响应有别于非岩溶区农业系统。贵州省龙里县羊鸡冲岩溶小流域,利用卡口站监测到氮流失的月均浓度为 $0.729 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[10];Cuo 等^[11]研究了柳州官村地下河系统的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 ($0.58 \sim 3.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及其年流失量 ($2.12 \times 10^4 \text{ kg}$);Liang 等^[12]估算了峰丛洼地区作物、畜禽等农产品氮输出和 NH_3 的流失。本文在参考区域氮循环模型的基础上,以桂林寨底地下河系统为例,通过地下径流水土流失、挥发和农产品输出等途径开展西南岩溶区典型地下河农业系统氮流失研究,为防治漓江流域氮的面源污染、建设桂林国际旅游胜地提供科技支撑。

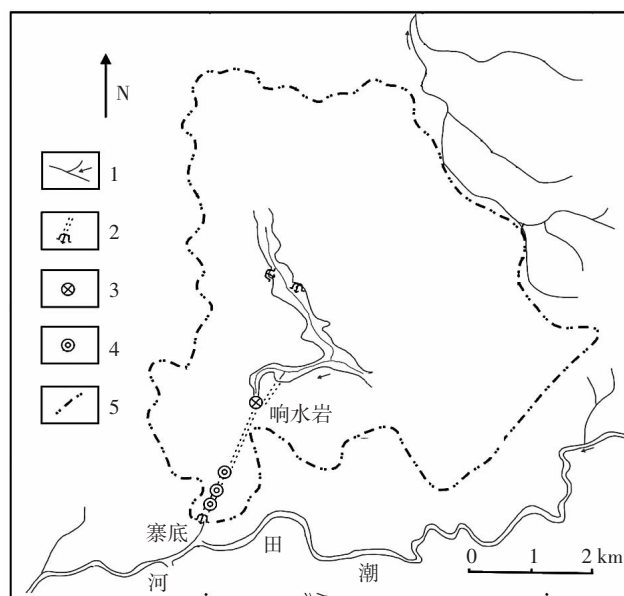
1 材料与方法

1.1 寨底地下河农业系统概况

寨底地下河农业系统位于桂林市东部灵川县海洋乡境内,地理坐标为 $25^\circ 13' 59'' \sim 25^\circ 18' 19'' \text{N}$, $110^\circ 32' 36'' \sim 110^\circ 37' 22'' \text{E}$ 。

该系统属亚热带季风气候区,四季分明,多年平均降水量 1601 mm。系统外,北部的地表水属于湘江水系,由南向北流;南部则为漓江水系,从北往南流。系统内,接受的大气降水以及部分岩溶地下水仅在响水岩以北形成地表径流,之后渗入地下,最终在南部的潮田乡寨底村北部的地下河出口流出,汇入漓江一级支流潮田河中(图 1)。

寨底地下河农业系统是一个典型的农耕区,系统面积约 33 km^2 ,草地、林地等生态用地约占 70%,其余为耕地(稻田为主)、园地(果园为主)、居民地和少量工矿用地与裸地。总人口数约 3200 人(580 户),常住人口数 1300 人。年出栏猪 1900 头、家禽 3000



1- 地表水系及其流向;2-地下河管道及其出口;3-天窗;
4-落水洞;5-寨底地下河系统边界

图 1 寨底地下河系统水系图

Figure 1 Drainage map outside/inside Zhaidi underground river system

只,役用牛 160 头。

1.2 农产品输出 N 计算

区内输出的农产品主要有桃、李、柑橘、银杏和猪等。水稻等粮食作物自给自足,不作为产品输出。由于难以统计自产农产品消费的数量,每项农产品输出量以其产量替代,则有:

农产品输出 N = 农产品输出量 × 农产品含 N 率

果品输出量为调查所得的种植面积与单产之积,果品含 N 率由干重的含 N 量乘以干重/湿重求得。而猪肉输出量为年出栏数乘以每头猪的重量和出肉率(取 0.7),猪肉含 N 率由猪肉蛋白质含量(取 15%)和蛋白质含 N 率(取 16%)相乘获得。主要农产品 N 计算参数的取值与依据见表 1。

1.3 水土流失输出 N 计算

水土流失输出 N 主要由地下水中水溶态 N 和泥沙吸附态 N 两部分构成。

表 1 农产品输出 N 计算特征值

Table 1 Eigenvalues for computing N outputs of farm products

类别	数量	单产	干湿重比/ %	N 含量与 干重比/%	文献源
桃	395.08 hm^2	14 461.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	15.00	0.96	[13]
李	56.03 hm^2	37 500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	18.90	1.01	[14]
橘	95.72 hm^2	28 723.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	13	1.20	[15-16]
银杏	182.50 hm^2	1 192.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	54	1.04	[17-18]
猪	1900 头	90 $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$		2.4	[19]

1.3.1 地下水流量及 N 浓度获取

按地下水污染地质调查评价规范(中国地质调查局地质调查技术标准,DD2008-01),系统地开展地下水水质和流量监测,每月一次在寨底地下河出口测定流量并采集水样。水样送中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶地质资源环境测试中心,分析其中 NO₃⁻、NH₄⁺、NO₂⁻含量等;流量用矩形堰或流速仪测量后换算而得(表2)。

1.3.2 岩溶地下水中水溶态 N 计算

地下水中水溶态 N=水体 N 浓度×流量

以 2008—2012 年每月监测的“三氮”含量和流量均值相乘^[20-21],求得随地下河水流失的水溶性氮的月平均值。

1.3.3 岩溶地下水中泥沙吸附态 N 计算

岩溶地下水中泥沙吸附态 N=地下河系统面积×单位面积吸附态氮的流失量

单位面积吸附态氮的流失量受气候(降雨量)、地质(土壤类型、成土速率等)、地貌分异(水动力差异)、植被等自然因素和土壤氮质量分数(主要是施肥的贡献)、土地利用等人因素控制。珠江流域年降雨量 1200~2200 mm,多年平均侵蚀模数为 1.49×10⁵~5.11×10⁵ kg·km⁻²,多年平均输沙模数为 1.74×10⁵~2.01×10⁵ kg·km⁻²。据杨胜天等^[22]研究,珠江流域年单位面积吸附态氮的流失量为 530 kg·km⁻²,且重点流失区主要分布在红水河、柳江、西江以及北江的上游地区。寨底地下河系统位于西江中游的桂江中上游(即漓江),多年平均输沙量 6 973.2 t(泥沙输移比 0.41),输沙模数 2.11×10⁵ kg·km⁻²,比珠江略高,与西江相仿(2.25×10⁵ kg·km⁻²)^[23]。因此,取珠江流域的单位面积吸附态 N 的流失量(530 kg·km⁻²)来计算寨底地下河水泥沙吸附态 N 是基本可行的,其结果可能略偏小。

1.4 肥料中氨挥发输出 N 计算

据研究^[24-25],寨地地下河农业系统内没有或者很少发生反硝化作用,不考虑气态的氮氧化物输出,主要计算耕地、果园施肥和人畜粪便等途径氨挥发输出

的氮。

将研究区人畜数量及其排泄量与人畜排泄物含氮率及其挥发率相乘,可得出人畜排泄物挥发的氮量。同理,将果园和耕地面积、单位面积施肥量、肥料含氮量及其挥发率相乘,计算出果园和耕地肥料的挥发氮量。核用银杏因近年价格低且施肥少、甚至不施肥,故不列入氮挥发输出计算。在给计算参数赋值时,没有进一步区分成人与小孩,畜禽分别按生猪、役用牛和蛋鸡来处理,因此人粪便挥发性氮量会偏大。以上计算特征值赋值见表 3 和表 4。

2 结果与讨论

2.1 寨底地下河农业系统水土流失的氮

2.1.1 寨底地下河水中溶解态氮

由表 2 知,寨底地下河出口每月随地下河水流失的溶解态氮浓度为 3.054~8.20 mg·L⁻¹(年平均浓度为

表 3 耕地和果园氨挥发特征值
Table 3 Eigenvalues for computing N outputs by ammonia volatilization in cultivated area and orchards

类别	单位施肥量/kg·hm ⁻²	次数	面积/hm ²	含 N 率/%	N 挥发率/%	文献源
桃	375.38	3	395.08	15	9	[26]
李	525.53	3	56.03	15	9	[26]
橘	563.06	3	95.72	15	9	[26]
水稻	1 051.05	1	182.50	46	25	[27]

表 4 人畜粪便氨挥发特征值
Table 4 Eigenvalues for computing N outputs by ammonia volatilization of human and animal excreta

类别	单位排泄量	周期	数量	含 N 率/%	N 挥发率/%	文献源
人 粪	90 kg·a ⁻¹ ·人 ⁻¹	1 a	1300 人	1.0	20	[28]
尿	700 kg·a ⁻¹ ·人 ⁻¹			0.5	20	
猪 粪	8.3 gN·d ⁻¹ ·头 ⁻¹	199 d	1900 头		20	[29]
尿	25.9 gN·d ⁻¹ ·头 ⁻¹				20	
牛 粪	24.4 kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹	365 d	160 头	0.44	20	[30]
尿	10.55 kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹			0.80	20	
家禽 粪	53.3 kg·a ⁻¹ ·只 ⁻¹	1 a	3000 只	1.032	20	[31]

表 2 寨底地下河出口流量和溶解态氮含量
Table 2 Discharge and soluble nitrogen at exit of Zhaidi underground river

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N/mg·L ⁻¹	6.70	6.34	8.18	6.12	8.20	4.66	6.09	3.054	4.56	5.37	5.20	4.00
NO ₃ -N/%	99.9	99.5	100	99.9	99.9	99.6	99.9	99.0	92.8	100	99.9	99.9
流量/L·s ⁻¹	25	150	546.4	1518	890.7	1225	2231	440.9	69.1	36	31	22.5
流量/L·s ⁻¹ *	97.7	168.5	158.4	173.6	283.8	351.6	173.8	135	144.6	100	124.8	66.7

注:*1981 年 8 月—1982 年 7 月,引自中华人民共和国区域水文地质普查报告(1:200 000 桂林幅,广西壮族自治区地质矿产局,1983)。

$5.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。水中溶解态氮类型为 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、 NH_4^+-N , 其中 NO_3^--N 占 99.2% (92.8%~100%)。通过计算可得, 寨底地下河农业系统每月经地下河水损失的溶解态氮为 $94.3 \sim 8217 \text{ kg}$ (平均 2187 kg), 全年流失量为 $2.62 \times 10^4 \text{ kg}$, 占水土流失氮的 60%。这一结果与同属珠江流域的面积为 30.5 km^2 的官村地下河流失量相当^[11]。在 1981 年 8 月至 1982 年 7 月的一个水文年中(降雨量约 1600 mm), 寨底地下河出口月平均流量约 $164.9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 水中硝酸盐浓度均值为 $2.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (广西壮族自治区地质矿产局, 1983), 计算出流失的溶解态氮为 $0.29 \times 10^4 \text{ kg}$ 。可见, 30 年中寨底地下河年流失的溶解态氮增加了约 8 倍, 反映了“三农”变革与全球气候变化下极端降雨事件的双重影响。

流失的溶解态氮呈季节性变化, 与降雨量、地下河流量关系密切(图 2)。92.7% 的氮流失集中在雨季, 雨季后氮的流失急剧减少。地下河水 NO_3^- 中 ^{15}N 、 ^{18}O 研究结果表明^[24-25], 上半年流失的溶解态氮以化肥源为主(61%), 而下半年主要源于动物粪便与污水源氮。这与寨底地下河农业系统主要农作物的施肥多集中在上半年的调查结果基本吻合。从 1 月到 6 月, 桂林月均气温和降水量增加, 意味着施肥期与雨热同季的耦合驱动了化肥源氮的大量流失。

2.1.2 寨底地下河泥沙吸附态氮

通过计算, 寨底地下河水泥沙吸附态氮为 $1.75 \times 10^4 \text{ kg N} \cdot \text{a}^{-1}$, 占水土流失氮的 40%。研究表明^[6], 嘉陵江流域(年均降雨量约 1000 mm)草地年单位面积吸附态氮的流失量为 $334 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, 若简单地考虑降雨量与吸附态氮呈线性关系(实为指数关系), 可推算寨底地下河农业系统草地(面积占 40%)的年单位面积吸附态氮的流失量为 $534 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, 与前述的珠江流

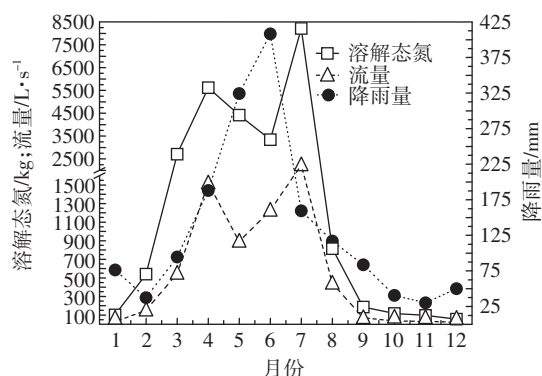


图2 寨底地下河流量、溶解态氮与降雨量的月际变化

Figure 2 Monthly changes in precipitation, discharge and water-soluble N in Zhaidi karst underground river

域年单位面积吸附态氮的流失量大致相近。依据年均侵蚀模数 ($5.15 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$) 与年单位面积吸附态氮的流失量 ($530 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$), 寨底地下河水泥沙吸附态氮浓度为 $1.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 泥沙^[23]。

2.2 寨底地下河农业系统氨挥发流失的氮

寨底地下河农业系统每年氨挥发逸失的氮约 $3.91 \times 10^4 \text{ kg}$, 以稻田逸失氨氮为主, 约 $2.21 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占 56.52%, 是所施尿素转化与石灰土双重因素影响的结果^[32]。其次为桃园, 约 $0.6 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占 15.35%, 其余途径逸出的氨态氮为 $0.1 \times 10^4 \sim 0.3 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3)。

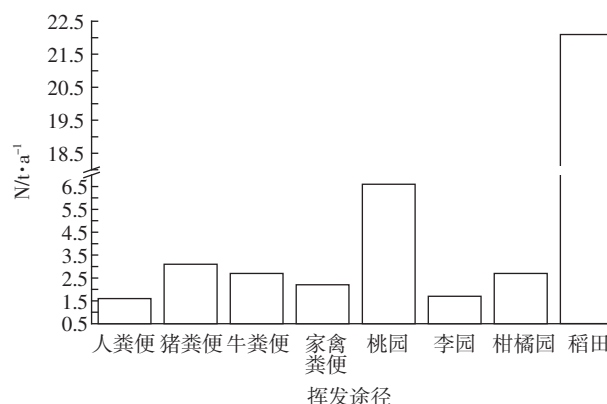


图3 寨地地下河农业系统氨挥发流失的氮

Figure 3 Nitrogen losses by ammonia volatilization in agricultural system of Zhaidi karst underground river

2.3 寨底地下河农业系统农产品输出的氮

寨底地下河农业系统农产品输出的氮约为 $2.06 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占流失氮的 20%, 其中: 鲜桃输出的氮为 $0.82 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占 39.81%; 柑橘和李子输出的氮相当, 分别为 $0.43 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.40 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占 20.87% 和 19.42%; 猪肉输出氮 $0.29 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占 14.08%; 银杏输出的氮最少, 约 $0.12 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 仅占 5.83%。这表明系统内由曾经简单的粮-银杏到现在的粮-桃、柑橘、李、银杏复合种植结构的调整, 大大增加了农产品的氮输出。

3 结论

寨底地下河农业系统以水稻和林木为主的种植结构、传统的耕作方式与农村生活条件是影响氮素流失的主要因素。该地区年流失氮素总量为 $1.03 \times 10^5 \text{ kg}$, 其中水土流失氮 $4.37 \times 10^4 \text{ kg}$, 氨挥发逸失氮 $3.91 \times 10^4 \text{ kg}$, 农产品输出氮 $2.06 \times 10^4 \text{ kg}$ 。该系统流失氮素的 80% 以液态和气态进入地表水体和大气环境, 其面源污染增加了漓江流域的生态环境压力。

寨底地下河农业系统每年通过水土流失的溶解态氮为纯 N 2.62×10^4 kg, 其中 99% 为 NO_3^- -N, 且上半年以化肥源为主, 比 30 年前增加了约 8 倍; 泥沙吸附态氮为 1.75×10^4 kg, 流失量约相当于 $1.03 \text{ gN} \cdot \text{kg}^{-1}$ 泥沙。

寨底地下河农业系统氮损失的氮一半以上源自稻田, 因此需要从肥料种类、施肥量、施肥深度等方面综合管理以减少稻田氮挥发。

参考文献:

- [1] 武兰芳, 欧阳竹. 种养结合生产区农田氮素平衡分析: 以山东省禹城为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1312-1319.
WU Lan-fang, OUYANG Zhu. Nitrogen budget of farmland in crop-animal mixed farming system area: A case study of Yucheng County in Shandong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1312-1319.
- [2] 王立刚, 李虎, 王迎春, 等. 小清河流域畜禽养殖结构变化及其粪便氮素污染负荷特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 986-992.
WANG Li-gang, LI Hu, WANG Ying-chun, et al. Changes in livestock operation systems and their contributions to manure nitrogen pollution loading in Xiaoqinghe watershed, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 986-992.
- [3] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
ZHU Mei. Study on agricultural NPS loads of Haihe basin and assessment on its environmental impact[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [4] 姜甜甜, 席北斗, 侯浩波, 等. 湖北省土壤侵蚀量模拟及其在吸附态氮、磷量匡算中的应用[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1249-1255.
JIANG Tian-tian, XI Bei-dou, HOU Hao-bo, et al. Simulation of soil erosion and its application in the assessment of absorbed nitrogen and phosphorus load in Hubei Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11): 1249-1255.
- [5] 余进祥, 郑博福, 刘娅菲, 等. 鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 3980-3989.
YU Jin-xiang, ZHENG Bo-fu, LIU Ya-fei, et al. Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3980-3989.
- [6] 龙天渝, 刘腊美, 李崇明, 等. GIS 的嘉陵江流域吸附态氮磷污染负荷研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(3): 87-91.
LONG Tian-yu, LIU La-mei, LI Chong-ming, et al. A GIS-Based study of the pollution load of adsorbed nitrogen and phosphorus in Jialing River Basin, P. R. China[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2008, 30(3): 87-91.
- [7] 李英俊, 王克勤, 宋维峰, 等. 自然降雨条件下农田地表径流氮素流失特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 19-23.
LI Ying-jun, WANG Ke-qin, SONG Wei-feng, et al. Nitrogen loss in farmland surface runoff under the natural rainfall conditions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(4): 19-23.
- [8] 黄云凤, 张路平, 洪华生, 等. 小流域氮流失特征及其影响因素[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 801-807.
HUANG Yun-feng, ZHANG Luo-ping, HONG Hua-sheng, et al. Characteristics and influencing factors of nitrogen loss of subwatershed[J]. *Shuili Xuebao*, 2006, 37(7): 801-807.
- [9] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
YUAN Dao-xian, CAI Gui-hong. Karst environment[M]. Chongqing: Chongqing Publishing Press, 1988.
- [10] 李瑞, 杨光敏, 李勇, 等. 贵州省喀斯特地区典型小流域水土流失面源污染研究[J]. 水土保持技术, 2014(1): 1-4.
LI Rui, YANG Guang-xi, LI Yong, et al. Research on non-point source pollution of soil and water loss in small watershed in karst region of Guizhou Province[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2014(1): 1-4.
- [11] Guo F, Jiang G H. Nitrogen budget of a typical subterranean river in peak cluster karst area[J]. *Environ Geol*, 2009, 58: 1741-1748.
- [12] Liang L, Wang J, Yue C Y. Evaluating nitrogen management of farm systems in the steep-mountanaous karst region[J]. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 2008, 2(2): 180-186.
- [13] 李庆军, 陈宝江, 姚亚杰, 等. “晴朗”桃树体内营养元素年际变化规律和特征研究[J]. 湖南农业科学, 2010(7): 124-125.
LI Qing-jun, CHEN Bao-jiang, YAO Ya-jie, et al. The annual dynamic change regularity and characteristics of nutrient elements in the Qinglang nectarine[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010(7): 124-125.
- [14] 李鑫, 张丽娟, 刘威生, 等. 李营养累积、分布及叶片养分动态研究[J]. 土壤, 2007, 39(6): 982-986.
LI Xin, ZHANG Li-juan, LIU Wei-sheng, et al. On nutrient accumulation and distribution in plum tree as well as nutrient dynamic changes in plum leaves[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 982-986.
- [15] 吴志丹, 王义祥, 翁伯琦, 等. 福州地区 7 年生柑橘果园生态系统的碳氮储量[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2008, 37(3): 316-319.
WU Zhi-dan, WANG Yi-xiang, WENG Bo-qi, et al. Organic carbon and nitrogen storage in 7 years old citrus orchard ecosystem in Fuzhou, China[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2008, 37(3): 316-319.
- [16] 解发, 彭良志, 淳长品, 等. 纽荷尔和清家脐橙果实大量矿质营养元素含量与累积变化[J]. 中国南方果树, 2012, 41(1): 7-10.
XIE Fa, PENG Liang-zhi, CHUN Chang-pin, et al. Study on the changes of macro-element contents and accumulation in fruits of Newhall and Seike Navel orange[J]. *South China Fruits*, 2012, 41(1): 7-10.
- [17] 贾自力, 杨勤兵, 李淑媛. 不同树龄白果中营养成分的比较分析[J]. 中国食物与营养, 2010(7): 72-75.
JIA Zi-li, YANG Qin-bing, LI Shu-yuan. Analysis of nutritional components of *Ginkgo biloba* from different tree-age maidenhair tree[J]. *Food and Nutrition in China*, 2010(7): 72-75.
- [18] 王建, 贾玉彬, 张钢民. 银杏种子生长发育过程中营养元素含量相关性分析[J]. 河北林果研究, 1998, 13(1): 49-53.

- WANG Jian, JIA Yu-bin, ZHANG Gang-min. Correlation between nutrition elements during growth and development of *Ginkgo biloba* seeds[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 1998, 13(1):49-53.
- [19] 林 岩, 郭培源, 王昕琨. 基于近红外光谱的猪肉蛋白质及脂肪含量检测[J]. *食品科技*, 2014, 39(2):262-266.
- LIN Yan, GUO Pei-yuan, WANG Xin-kun. Detection of meat protein and fat percentage composition based on near-infrared spectrum[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(2):262-266.
- [20] 裴建国. 寨底地下河系统水质演化趋势及碳汇通量分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- PEI Jian-guo. The analysis of water quality trends and carbon sinks flux in Zhaidi underground river systems[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [21] 玉 宏. 寨底岩溶地下水污染评价及氮循环研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2013.
- YU Hong. Research on pollution evaluation and nitrogen cycle of karst groundwater in Zhaidi[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2013.
- [22] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3):366-374.
- YANG Sheng-tian, CHENG Hong-guang, BU Qing-song, et al. Estimation of soil erosion and its application in assessment of the absorbed nitrogen and phosphorus load in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3):366-374.
- [23] 蔡德所, 王 魁, 张永祥, 等. 典型岩溶区小流域土壤流失量估算研究: 以桂林寨底地下河流域为例[J]. *中国水土保持*, 2012(3):21-24.
- CAI De-suo, WANG Kui, ZHANG Yong-xiang, et al. Evaluation on soil loss of small watersheds in typical karst area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(3):21-24.
- [24] 卢 丽, 李文莉, 裴建国, 等. 基于 IsoSource 的桂林寨底地下河硝酸盐来源定量研究[J]. *地球学报*, 2014, 35(2):248-254.
- LU Li, LI Wen-li, PEI Jian-guo, et al. A quantitative study of the sources of nitrate of Zhaidi underground river in Guilin based on IsoSource[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(2):248-254.
- [25] 王 松, 裴建国. 桂林寨底地下河硝酸根含量特征研究[J]. *地下水*, 2011, 33(3):21-22.
- WANG Song, PEI Jian-guo. Study of content characteristics of nitrate in subterranean stream of Zhaidi, Guilin[J]. *Ground Water*, 2011, 33(3):21-22.
- [26] 胡小凤, 王正银, 游 媛, 等. 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发特性研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(8):1937-1943.
- HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, YOU Yuan, et al. Ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different soils water conditions[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8):1937-1943.
- [27] Xing G, Zhu Z. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(1):67-73.
- [28] 广西土肥信息网. 肥料施用知识问答: 人类粪的排泄量及成分含量[EB/OL]. <http://gxtf.gxagri.gov.cn/lxdt/htm/rf.htm>.
- Guangxi soil and Fertilizer Information Network. Questions and answers of knowledge about fertilizer application: The excretion amount and composition content of human waste[EB/OL]. <http://gxtf.gxagri.gov.cn/lxdt/htm/rf.htm>.
- [29] 李梅书馆 0318. 畜禽粪尿排泄量[EB/OL]. 2013. http://www.360doc.com/content/13/0117/19/803452_260779194.shtml.
- Li M library 0318. Livestock manure excretion[EB/OL]. 2013. http://www.360doc.com/content/13/0117/19/803452_260779194.shtml.
- [30] 张 田, 卜美东, 耿 维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5):1241-1249.
- ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5):1241-1249.
- [31] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5):614-617.
- WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):614-617.
- [32] 刘立新. 旱地氮肥的氨挥发损失及提高肥效措施的研究[J]. *化肥工业*, 1990(3):51-56.
- LIU Li-xin. Study on the loss of ammonia volatilization of nitrogen fertilizer in dry land and improve measures[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 1990(3):51-56.