

滇池王家庄湖滨带人工湿地农业径流中磷去除的干湿季节性规律

卢少勇^{1,2}, 张彭义¹, 余刚¹, 祝万鹏¹, 向长生¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 中国环境科学研究院湖泊环境研究中心 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 王家庄人工湿地 (面积 12 000 m²) 位于云南滇池东岸呈贡县, 湿地进水来自 5 条农业区汇水干渠, 经矩形堰均匀布水后流过湿地。湿地于 2002 年 8 月起运行, 初期优势植物为茭草 (*Zizania latifolia*)、芦苇 (*Phragmites communis* Trin.)、莲藕 (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)、菖蒲 (*Acorus calamus*)、空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 和水芋 (*Calla palustris*)。7 个月后, 莲藕完全被水花生所替代。采用现场采样及室内分析的方法, 研究了湿地对农业径流中磷去除的季节性规律。结果表明, 2002 年 10 月至 2004 年 6 月, 湿地具有良好的拦截进水磷的能力, 有效降低了农业区农业径流对滇池的污染。进水总磷 (TP) 负荷为 241 (旱季, 每年 10 月至翌年 4 月) 和 199 (雨季, 每年 5 月至 9 月) g·hm⁻²·d⁻¹, TP 浓度为 0.04~3.21 (旱季) 和 0.00~1.44 (雨季) mg·L⁻¹。出水 TP 浓度沿程 1/3 处为 0.03~0.49 (旱季, 每年 11 月至翌年 4 月) 和 0.03~0.71 (雨季, 每年 5 月至 10 月) mg·L⁻¹, 沿程 2/3 处为 0.00~0.68 (旱季) 和 0.00~0.73 (雨季) mg·L⁻¹。TP 去除率沿程 1/3 处为 -73.7%~82.8% (旱季) 和 -215%~79.3% (雨季), 沿程 2/3 处为 -367%~100% (旱季) 和 -262%~93.1% (雨季)。受雨水稀释和停留时间变短的影响, 雨季的 TP 去除率低于旱季。受滇池水位和湿地出水水位的影响, 旱季时湿地 TP 的去除呈现“V”字型规律, 雨季时湿地 TP 去除率沿程降低。总体而言, 来水中的磷、有机质和速效铁以沿程逐渐降低的方式分布于湿地表层土壤中。秋末冬初时 (每年 11 月至 12 月), 菖蒲的含水率和生物量 (鲜重) 均比春季 (每年 3 月至 5 月) 的低, 而生物量 (干重) 比春季的高。菖蒲从 11 月到 12 月仍在生长发育。

关键词: 湖滨带; 人工湿地; 农业径流; 磷; 季节变化规律

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2006)05-1313-05

Wet-dry Seasonal Regularity of Phosphorus Removal from Agricultural Runoff by Constructed Wetland in Wangjiazhuang Lakeside Area

LU Shao-yong^{1,2}, ZHANG Peng-yi¹, YU Gang¹, ZHU Wan-peng¹, XIANG Chang-sheng¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Wangjiazhuang constructed wetland (with area of 12 000 m²), aimed at treating phosphorus carried by agricultural runoff, located at the eastern lakeside area of Dianchi Lake, belong to Chenggong County, Yunnan Province. Influent of the wetland came from 5 agricultural ditches, and the influent was equally distributed into the wetland via rectangular weir. The wetland came into operation since August 2002, the dominating helophytes species were *Zizania latifolia*, *Phragmites communis* Trin., *Nelumbo nucifera* Gaertn., *Acorus calamus*, *Alternanthera philoxeroides* and *Calla palustris* during the early operation period. After 7 months of operation, all the *Nelumbo nucifera* Gaertn. was replaced by the *Alternanthera philoxeroides*. From October 2002 to June 2004, wetland showed better capability of retaining phosphorus from the influent, and the wetland obviously decreased the contaminants load on Dianchi Lake. The index of water, soil and helophyte were analyzed by standard methods. The total annual phosphorus load of the wetland were 241 g·hm⁻²·d⁻¹ (in dry season, from November to next April)

收稿日期: 2005-11-25

基金项目: 国家重大科技专项“滇池流域面源污染控制研究”(K99-05-35-02)

作者简介: 卢少勇(1976—)男, 湖南郴州人, 博士, 中国环境科学研究院助理研究员, 研究方向为水环境污染防治与河湖生态修复。

E-mail: lusy@craes.org.cn

and $199 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (in rainy season, from May to October), the total phosphorus (TP) concentration were 0.04 to $3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (in dry season) and 0.00 to $1.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (in rainy season). The effluent TP concentrations were $-73.7\% \sim 82.8\%$ (in dry season) and $-215\% \sim 79.3\%$ (rainy season) in 1/3 position (located at one to third of the wetland's total flow path), $-367\% \sim 100\%$ (in dry season) and $-262\% \sim 93.1\%$ (rainy season) in 2/3 position (located at two to third of the wetland's total flow path). TP reduction rate was lower in rainy season than in dry season, due to the significant dilution function and smaller retention time of wetland during rainy season. During drought season, removal of TP in the wetland showed "V" shape rule along the flow path. But during rainy season, removal of TP in the wetland showed gradually decreased rule along the flow path. These phenomena were caused by the various statuses between water level of Dianchi Lake and wetland's effluent, i.e., Dianchi Lake's water level was higher than wetland's effluent water level during dry season, thus the effluent water quality was significant affected by the Dianchi Lake's water, while, Dianchi Lake's water level was lower than wetland's effluent water level during rainy season, thus the wetland's effluent could discharge to Dianchi Lake swimmingly. TP, rapid available phosphorus, organic content and rapid available iron gradually decreased in the top soil layer of wetland along the flow path. During end- autumn and early- winter (from November to December), water content and wet weight of *Acorus calamus* were lower than in spring (from March to May), but the dry weight of *Acorus calamus* was higher than in spring. From November to December, *Acorus calamus* was still in growth.

Keywords: lakeside area; constructed wetland; agricultural runoff; phosphorus; seasonal dynamic regularity

随着滇池流域社会和经济的发展,滇池的外源污染负荷总量在增加。随着对滇池周围点源污染治理力度的加大,面源污染的控制逐渐成为削减滇池外源污染负荷的关键。而农业径流携带的污染是农业区面源污染的重要组成部分,外源磷输入是导致湖泊、河流和海洋等水体富营养化的重要因素^[1-4]。因此控制农业径流携带的磷对于滇池污染防治和富营养化风险的削减具有重要的意义。在经济基础差和管理水平低的滇池东岸农业区,本研究因地制宜地选择了投资低、运行费用低和管理简便的表面流人工湿地技术来处理该区的农业径流,本研究总结了本人工湿地的磷去除的季节性变化规律,以期类似人工湿地的设计提供参考。

1 材料和方法

1.1 湿地环境概况

湿地位于昆明市呈贡县的大渔乡,呈狭长形,东西宽 $10 \sim 80 \text{ m}$,南北长 400 m ,全年主风向为西南风。湿地进水来自 5 条沟渠(图 1 中的 1 号到 5 号,其中 1 号和 2 号的水量往北引,总的来水量进入南北向的布水渠,通过间隔和高度合理配置的矩形堰口将来水合理地配置在湿地上),采样路有 3 条,从南到北将湿地分成面积为 890 、 1600 、 2380 和 1050 m^2 的 4 块^[5],详见图 1。

1.2 水样采集与分析方法

水量采用浮标法测定,选择布水渠中的平直段进行,沟渠两侧为不平整的陡岸,岸边流速系数取 0.8 ^[6]。测定流量后同时采集水样,包括进水、沿程 1/3 处(指从湿地进水堰起算,以湿地进水堰到出水堰的距离为

1)和沿程 2/3 处的水样。采用钼锑抗分光光度法分析总磷(TP),采用重量法测定悬浮物(SS)^[6]。从 2002 年 10 月至 2004 年 6 月,水样采集总次数为 49 次,雨季采样次数共 25 次(暴雨监测日仅取平均值,按采样 1 次计),旱季采样次数共 24 次,每年的 2 月份为春节放假,未采集水样。

2003 年 6 月 6 日的暴雨历时为从 1 00 到 23 00,共 1320 min ,降雨量 20.5 mm ,采样监测次数为 6 次。

1.3 土样采集与分析方法

2004 年 2 月和 5 月,采集表层土壤样品,2004 年 2 月在 3 号采样路沿程采样,样品采集深度为 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 。分析土壤中的速效磷、有机质、全磷、pH 值、速效铁、速效钙、速效镁和速效铝。测定方法见参考文献[7]。

1.4 植物样采集与分析方法

采集植物样品,现场用盘称($10 \text{ kg} \pm 50 \text{ g}$)测定鲜重、用直尺测定株高(地面到植物最长叶顶的距离)。植物样品带回实验室后于烘箱中在 105°C 下杀青 30 min ,于 65°C 下烘干至恒重后,测定植物中的磷的含量^[7]。

1.5 季节划分

当地的旱季和雨季的界限明显,雨季的降雨量占全年的 85%以上。旱季指每年的 10 月初至翌年的 4 月底,雨季指每年的 5 月初至 9 月底。

2 结果与讨论

2.1 旱季和雨季的处理效果

旱季的平均流量为 $497.6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,雨季的平均流量为 $747.4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。旱季(2002 年 10 月—2003 年 4 月

和 2003 年 10 月—2004 年 4 月) 和雨季 (2003 年 5 月—2003 年 9 月和 2004 年 5 月—2004 年 6 月) 的湿地进出水浓度范围见表 1。

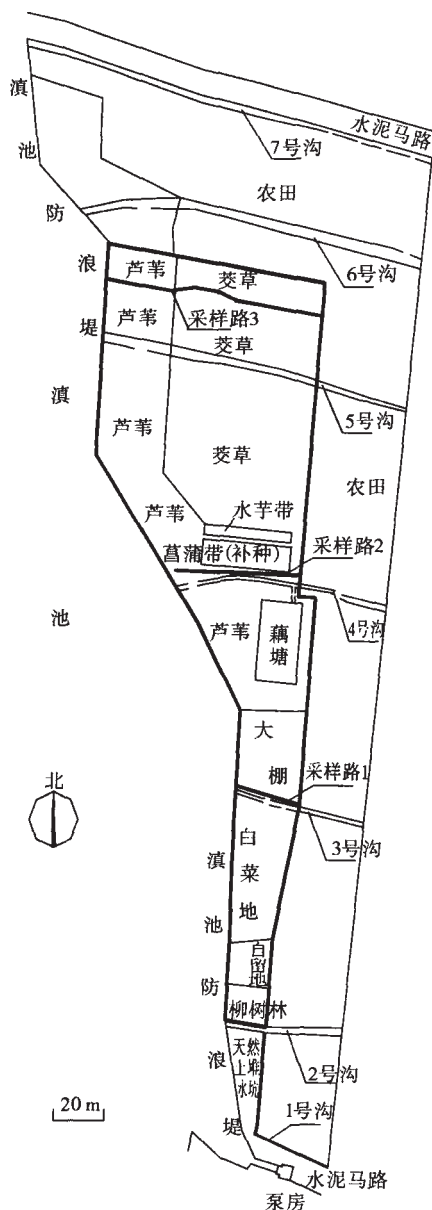


图 1 王家庄湿地平面示意图

Figure 1 Schematic diagram of Wangjiazhuang wetland

表 1 旱季和雨季王家庄湿地进水和出水的总磷浓度范围

Table 1 Influent and effluent total phosphorus concentrations in Wangjiazhuang wetland in dry season and rainy season

	旱季	雨季
进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.04~3.21	0.00~1.44
沿程 1/3 处浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.03~0.49	0.03~0.71
沿程 2/3 处浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.00~0.68	0.00~0.73
沿程 1/3 处去除率/%	-73.7~82.8	-215~79.3
沿程 2/3 处去除率/%	-367~100	-262~93.1

由表 1 可见, 雨季的进水 TP 变化幅度小于旱季, 旱季的最大值高于雨季。这是因为虽然初期降雨时雨水径流携带了在非降雨阶段积累的污染物, 但另一方面, 大量的雨水具有稀释作用, 而旱季无雨水稀释作用。

在沿程 1/3 处, 雨季的 TP 浓度去除率的变化幅度均大于旱季。这是因为雨季的进水量变化幅度大, 湿地经受的水量冲击负荷大, 相应地去除率的变化幅度也大。

在沿程 2/3 处, 雨季的 TP 变化幅度接近旱季, 而 TP 去除率的变化幅度小于旱季。因雨季滇池水位低于湿地出水, 旱季滇池水位高于湿地出水, 所以沿程 2/3 处的水质受滇池影响的程度在旱季时明显大于雨季时。

湿地的进水浓度和沿程的去除率情况见图 2。

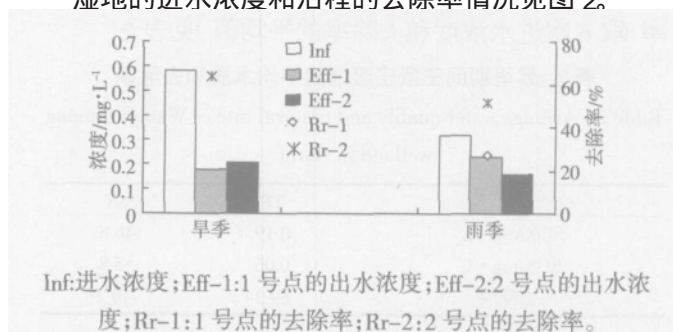


图 2 旱季和雨季王家庄湿地进出水总磷的平均浓度和去除率

Figure 2 Influent and effluent average total phosphorus concentration and average total phosphorus removal rate of Wangjiazhuang wetland in dry season and rainy season

由图 2 可见: 旱季进水 TP 平均浓度为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在湿地流程的 1/3 处和 2/3 处, TP 的平均去除率分别为 68.3% 和 63.8%。由于此阶段滇池水位高, 滇池水反灌湿地, 去除率最大点并非为湿地出水端, 估计最大去除率点在湿地的沿程 1/3 处和沿程 2/3 处之间。雨季进水 TP 平均浓度为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 51.3%。

不论雨季还是旱季, 磷的平均去除率大于 50%, 说明试验期间本湿地的总磷去除率较高。而文献^[8-10]表明人工湿地中的磷去除率通常较低。因为受当地旱季和雨季交替的影响, 以及大棚种植区独特的间歇性且有峰值的水量排放规律的影响, 湿地常年处于淹水和落干的循环, 湿地的土壤通常处于好氧、缺氧和厌氧交替阶段, 利于系统对磷的去除。另外, 当地的土壤具有很高的磷吸附容量^[11]。

磷去除率的波动性大, 这和文献^[8-10]一致。

旱季的处理效果优于雨季。主要因为旱季的进水量小于雨季,旱季的停留时间长于雨季的,雨季的平均进水磷浓度由于受到雨水稀释的影响而低于旱季时的磷浓度,而平均出水浓度相差不大。

雨季时,进水浓度>沿程 1/3 处浓度>沿程 2/3 处浓度,说明湿地中污染物浓度沿程降低。表明湿地出水受滇池水的影响很小。

旱季时,沿程 1/3 处中的 TP 的浓度高于沿程 2/3 处中的浓度,即湿地出水(尤其在低浓度进水时期)受滇池水的影响较大,湿地内的沿程污染物浓度呈“V”字形规律变化。

2.2 暴雨期间的处理效果

以 2003 年 6 月 6 日暴雨时王家庄湿地的运行数据为例来说明本工程在大雨日的运行效果。湿地进水量 $1866 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水力负荷 $22.2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$,其水质和去除率(取 6 次进水浓度和去除率的平均值)见表 2。

表 2 暴雨期间王家庄湿地的平均水质和去除率

Table 2 Average water quality and removal rate of Wangjiazhuang wetland in storm

	TP	SS
进水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.19	46.8
出水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.06	55.8
去除/%	69.3	-19.2

由表 2 可见,暴雨期间,王家庄湿地的水力负荷($22 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$)略超出高拯民^[12]等的推荐值($2\sim 20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$)的上限值,在此条件下,TP 的去除率较高。SS 的去除率为负值,表明来水水量大对湿地沉积物有一定的搅动作用,导致已沉积污泥的再悬浮。

2.3 土壤性质的变化

不同时间采样和沿程采样的测定结果见表 3 和图 3。

由表 3 可见,从 2004 年 2 月到 2004 年 5 月的土壤全磷基本一致,有机质降低,主要因为从 2 月到 5 月,植物处于快速增长期,植物因生长需要而从土壤中吸收磷。土壤 pH 值略大于 7,为偏碱性土。根据文献^[10],碱性土壤中对磷的吸附起主要作用的是钙和镁,而速效钙和速效镁的含量升高,表明此期间被钙和镁所吸附的部分磷被释放。

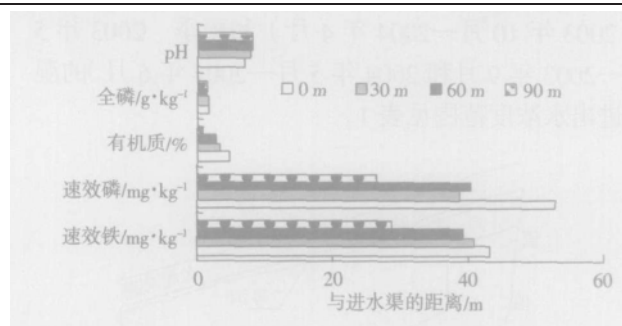


图 3 王家庄沿程 pH 值和土壤养分的变化
(土层深度为 0~40 cm)

Figure 3 Changes of pH value and nutrient content in top soil in Wangjiazhuang wetland along the flow path

由图 3 可见,pH 值沿程升高,速效铁、有机质和磷沿程降低。这说明总体而言,来水的磷、碳和铁以沿程逐渐降低的方式分布于湿地的表层土壤中。

2.4 植物生长

由于同时正在进行相距不足 1 000 m 的新村湿地和新村中试的研究中,对新村湿地的芦苇、茭草、水葫芦和浮萍,新村中试的马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica*)、慈菇(*Sagittaria trifolia*)和莲藕均已进行了采样分析(含水率、磷含量和生物量),在王家庄湿地中主要分析菖蒲,见表 4 和表 5。

2004 年 5 月 30 日,菖蒲的生物量(鲜重)为 $4.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。同年 6 月 14 日,菖蒲的生物量(鲜重)为 $4.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由表 4 可见,在同一时期(2003 年 12 月和 2002 年 12 月)相比,菖蒲的株高有增加,这可能是菖蒲逐渐适应环境的结果。

由表 5 可见,对比不同时期(秋末冬初时期与春季时期)内,残留部分与收割部分的磷含量的差值,不难发现,在秋末冬初时期,此差值大于春季时期,这可能是因为在秋末冬初时,收割部分(茎叶为主)的磷向残留部分(根为主)转移。Meuleman 等(2003)^[10]认为,湿地中的磷去除可通过当年 10 月左右收割而不是在次年 1 月收割植物而得到提高。因为在 10 月以后,营养物会向根转移。

秋末冬初时,菖蒲的含水率和春季相比有降低,生物量(鲜重)也比春季低。含水率的变化和菖蒲的生长规律有关,菖蒲在生长发育初期(春季)枝叶稚嫩,

表 3 王家庄湿地土壤的 pH 值和养分的变化(土层深度为 0~40 cm)

Table 3 pH value and nutrient content of topsoil (0~40 cm) in Wangjiazhuang wetland

年-月	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/%	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	速效铁/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钙/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效镁/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效铝/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
04-02	39.5	2.89	1.59	7.76	38.0	3 760	1 104	2.33
04-05	29.0	2.27	1.60	7.42	33.5	3 800	1 632	8.48

表 4 植物高度测定结果

Table 4 Measurement result of helophyte's height

时间	植物名称	平均株高 cm	最大株高 cm	最小株高 cm
2002 年 12 月 10 日	菖蒲	103.1	113.0	91.2
2003 年 7 月 15 日	菖蒲	111.2	120.1	96.3
2003 年 11 月 5 日	菖蒲	106.2	115.1	96.2
2003 年 12 月 1 日	菖蒲	112.2	123.3	105.6
2004 年 6 月 13 日	菖蒲	107.9	115.0	101.0

表 5 菖蒲组织中的磷、鲜重和含水率

Table 5 Phosphorus, fresh weight and water content of *Acorus calamus*'s tissues

年-月-日	收割部分 磷/g · kg ⁻¹	残留部分 磷/g · kg ⁻¹	鲜重* /kg · m ⁻²	含水率* /%	干重* /kg · m ⁻²
2003-11-15	2.60	4.50	2.42	77.4	0.55
2003-12-1	3.00	5.10	2.26	71.7	0.64
2004-4-17	3.15	4.43	2.59	90.6	0.24

注:* 鲜重、干重和含水率均是指收割部分的数值。

含水率高,而在成熟和枯萎时期(秋末冬初时),枝叶趋于枯萎,含水率变低。虽然秋末冬初时鲜重有所降低,但是干重增加,这表明菖蒲从 11 月到 12 月仍在生长发育。

3 结论

(1)旱季期间的磷去除率高于雨季。雨季时,湿地中磷浓度沿程降低。旱季时湿地内的磷浓度沿程呈“V”字形规律变化。

(2)总体而言,来水中的磷、碳和铁以沿程逐渐降低的方式分布于湿地表层土壤中。

(3)秋末冬初时,菖蒲的含水率和生物量(鲜重)均比春季的低,而生物量(干重)比春季的高。菖蒲从 11 月到 12 月,仍在生长发育。

参考文献:

- [1] 金相灿,尚榆民,徐南妮,等. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- [2] Lau P S, Tam N F Y, Wong Y S. Wastewater nutrients (N and P) removal by carrageenan and alginate immobilized *Chlorella vulgaris*[J]. Environmental Technology, 1997, 18: 945- 951.

- [3] Trépanier C, Parent S, Comeau Y, et al. Phosphorus budget as a water quality management tool for closed aquatic mesocosms [J]. Water Research, 2002, 36: 1007- 1017.
- [4] De- Basha L E, Basha Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997- 2003)[J]. Water Research, 2004,38: 4222- 4246.
- [5] 卢少勇,张彭义,余刚,等. 农田排灌水湖滨带湿地处理系统的设计与运行[J].农业环境科学学报,2004,23(5): 998- 1002.
- [6] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [8] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations[J]. Ecol Eng, 1999, 12: 5- 12.
- [9] Steer D, Fraser L, Boddy J, et al. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent [J]. Ecol Eng, 2002, 18: 429- 440.
- [10] Meuleman A F M, Van Logtestijn R, Rijs G B J, et al. Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2003, 20:31- 44.
- [11] 刘忠翰,彭江燕.滇池流域农业区排水水质状况的初步调查[J]. 云南环境科学,1997, 16(2): 6- 9.
- [12] 高拯民,李宪法.城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京:中国标准出版社,1990.