

# 土壤对城市雨水径流中污染物的削减作用

袁宏林<sup>1</sup>, 魏颖<sup>1,2</sup>, 谢纯德<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710056; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710055)

**摘要:** [目的] 分析城市雨水径流在土壤中的净化情况及径流污染物对土壤环境造成的影响。[方法] 在充分了解陕西省西安市某地土壤特性和当地雨水径流水质的基础上, 模拟城市土壤表层系统和雨水径流装置, 研究雨水径流中的污染物在下渗过程中土壤表层对它们的削减作用及土壤基本理化性质的变化。[结果] 在土壤层厚度为 20 cm, 雨水渗透量为 6 000 ml, 径流时间 3 h 的条件下, 裸土和绿地表层土壤对模拟雨水中各污染物的去除率均达到 40% 以上; 土壤的密度及 pH 值基本未发生变化, 氮的含量由原土的 54.95 mg/kg 分别增加到 65.10 (绿地) 和 68.60 mg/kg (裸土), 有效磷的含量由原土的 59.23 mg/kg 变化到 82.39 mg/kg (裸土) 和 39.93 mg/kg (绿地), 有机质的含量由原土的 18.32 mg/kg 变化到 19.28 mg/kg (裸土) 和 14.04 mg/kg (绿地)。[结论] 绿地对雨水径流处理效果较好。在渗流过程中, 土壤对氨氮的截留效果较为明显, 短时间内土壤基本物理性质变化不大。

**关键词:** 土壤表层; 雨水径流; 污染物; 土壤渗透; 削减率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0112-04

中图分类号: X523

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.026

## Soil Reduction Foundation of Pollutants in Urban Rainwater Runoff

YUAN Honglin<sup>1</sup>, WEI Ying<sup>1,2</sup>, XIE Chunde<sup>3</sup>

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710056, China; 2. Power China Xibei Engineering Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Xi'an Municipal Administration Design and Research Institute Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the decontamination condition of urban rainwater in soil and the effect of rainwater runoff pollutants on soil environmental. [Methods] Based on full understand of soil properties and the quality of runoff in Xi'an City of Shaanxi Province, the urban soil system and rainwater runoff device were simulated to analyze the reducing functions of topsoil on rainwater runoff pollutants in the process of infiltration, and the change of the basic physical and chemical properties of soil. [Results] As the soil layer thickness was 20 cm, total rainwater penetration was 6 000 ml, and the runoff time was 3 h, the removal rate achieved above 40% both in bare soil and green fields systems on simulated rainwater pollutants. The soil density and pH value did not changed. But for the content of nitrogen, effective phosphorus, and soil organic matter, from in the original soil to green fields and bare soil, they changed from 54.95 mg/kg to 65.10 mg/kg and 68.60 mg/kg, 59.23 mg/kg to 82.39 mg/kg and 39.93 mg/kg, 18.32 mg/kg to 19.28 mg/kg and 14.04 mg/kg, respectively. [Conclusion] The effect of green fields on runoff water treatment is significant. In the process of infiltration, soil present significant effect on removal of ammonia nitrogen, and soil basic physical properties show little change within a short time.

**Keywords:** topsoil; rainwater runoff; pollutant; soil infiltration; reduction rate

随着经济发展和人口的增长, 城市建设不断发展, 不透水区域面积所占比例越来越大, 使得城市水问题愈发严重<sup>[1-7]</sup>。一方面<sup>[2]</sup>, 地下水严重超采, 而雨水不能入渗地下补充地下水, 使得城市周围的水环境

和生态环境日渐恶化; 另一方面, 大雨时, 径流迅速汇集造成地面积水和城市局部洪灾。这样就导致大部分径流雨水无法得到合理有效的利用, 造成水资源的大量浪费, 那么雨水资源如何合理利用就引起了世界

收稿日期: 2014-04-27

修回日期: 2014-05-06

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(2009ZX07318-008-004)

第一作者: 袁宏林(1965—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 教授, 主要从事水体污染控制技术与理论研究。E-mail: hlyuan@xauat.edu.cn.

通信作者: 魏颖(1988—), 女(汉族), 山东省菏泽市人, 硕士, 主要从事雨水资源利用研究。E-mail: weiyiing517543860@126.com.

各国很多专家的关注和重视<sup>[3]</sup>。根据现代资源观念,城市雨水是一种宝贵的、可利用的自然资源<sup>[4]</sup>。这部分径流雨水在中国广大的缺水城市和地区有很大的开发利用潜力和社会价值。

很多学者认为城市雨水资源利用可以分为直接利用和间接利用 2 种<sup>[2]</sup>;直接利用指的是屋顶集雨、道路集雨和绿地水景水域拦蓄;间接利用主要指渗透技术,与前者相比,此种方法的适用范围更加广泛,环境效益更加显著。由于目前监测手段的落后,加之降雨过程的随机性,使得观测自然降雨条件下污染物在土体中的垂向迁移过程和规律在很大程度上存在周期长,工作量大,数据不够准确等困难和缺憾<sup>[5]</sup>,而北方雨水降雨比较集中且短暂,不便直接研究,欲对降雨—径流—渗流过程中污染物迁移规律进行准确、快速、全面的了解,采用高压供水土柱渗漏的试验方法,进行室内土柱模拟试验是一种行之有效的方法<sup>[6]</sup>。故本文将针对此问题在实验室内通过模拟来研究土壤表层对雨水径流下渗过程中污染物削减效果及径流污染物对土壤的影响。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

试验装置(如图 1 所示)由模拟土壤系统和模拟供水系统两部分组成。模拟土壤装置由圆柱体有机玻璃制成,直径  $D=30\text{ cm}$ ,高度  $H=25\text{ cm}$ (超高  $5\text{ cm}$ )。其中一个装置采用裸土,另外一个装置中采用含有草皮的土壤(该装置中植株密度为  $2\text{ 株}/\text{cm}^2$ )。

每种类型的渗流系统均另设一套平行装置。每个装置侧壁开有取水支管,并连有橡胶管。供水装置采用高位水箱,可实现定水头自动供水。

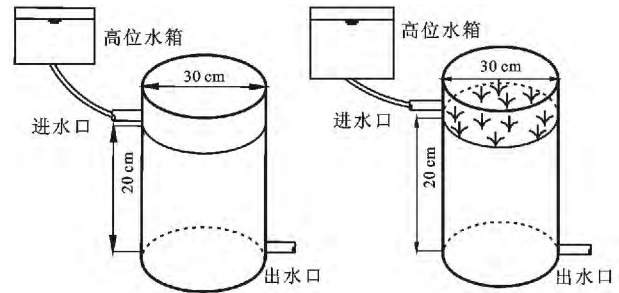


图 1 雨水净化试验装置

### 1.2 供试土壤采集

土壤是微生物生存、繁殖的良好载体,为使土壤发挥自身的净化作用,必须使土壤具有一定的孔隙率及良好的渗透性能。如果土壤的孔隙率比较小,那么土壤的透气性就会很差,影响到微生物的增殖进而削弱土壤对污染物的降解作用。

供试土壤选用西安市东郊微生物种类较多、土壤结构疏松的表层土。试验过程中供试土柱的填充选用离地表  $20\text{ cm}$  以内的土壤。采用分层取土,按照容重进行填充的方法获得供试土柱<sup>[8]</sup>。为了探讨径流污染物进入土壤后对土壤造成的影响,需要对原始土壤基本物理性质(含水率、密度、容重、孔隙率、pH 值、电导率)及初始营养盐含量进行分析。对该表层土壤样品测定 3 次取其平均值,得到试区土壤层的主要物理特性如表 1 所示。

表 1 试区土壤主要物理特性

含水率/ %	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙率/%	pH 值	电导率/ ( $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	氮含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
7.28	2.65	0.13	49.12	8.16	74.0	54.95	59.24	18.32

### 1.3 试验用水

采用模拟配水,其优点是水质稳定易于控制且易得<sup>[9]</sup>。为了试验过程中的人工配水能够代表实际径流雨水的水质,首先对西安市的径流雨水进行实测,

选择降雨量比较多的 7 月,分别采集校园路面、小寨、翠华路等路段的路面初期径流雨水。对水样中的 pH 值, COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , TN, TP 等主要污染指标进行分析,实际径流雨水水质指标见表 2。

表 2 实际径流雨水水质

采样点	时间	污染物浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )					pH 值
		COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TN	TP	
校园路面	20130715	405.10	7.11	1.86	25.84	1.26	7.33
	20130718	311.20	4.24	0.75	11.47	0.38	7.42
翠华路	20130715	556.75	4.99	0.61	21.81	1.73	7.38
	20130718	341.69	8.85	0.65	6.20	1.19	7.50
小寨路	20130715	586.45	10.97	0.55	27.46	2.89	7.46
	20130718	368.27	9.84	0.28	6.91	1.25	7.44

配水方案根据文献资料<sup>[10]</sup>和实测径流雨水水质设计,在自来水中加入葡萄糖、磷酸二氢钠、尿素和蛋白胨等,pH 值为 7.4 左右。根据表 2 中指标,试验模拟雨水进水水质如表 3 所示。

表 3 人工模拟雨水水质

指标	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP
浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	416.06	6.5	2.5	15.0	2.3

#### 1.4 分析方法

1.4.1 土壤分析方法 在取样地段上取样点的分布采用蛇形取样,取回土样后需要对土样进行预处理即:风干、研磨、过筛(10 目)后混匀,并密封在自封袋中备用。土壤含水率用铝盒烘干法进行测定;土壤容重采用环刀法进行测定;土壤 pH 值用 pH 计测定;土壤有机质通过重铬酸钾氧化—外加热法测定;土壤总氮用半微量凯氏法;土壤总磷采用碳酸钠熔融—钼锑抗比色法,以上项目的测定均按照《土壤农业化学分析方法》进行<sup>[11]</sup>。试验前后对土壤样品的各个指标均测定 3 次取其平均值。

1.4.2 水质分析方法 采用 20 cm 深度的土壤立柱进行模拟径流雨水的垂直渗透,过程进水总量为 6 000 ml。雨水渗入装置后,自出水口有水渗出时计时,每隔 20 min 取一次水样,在渗滤液产流后持续 3 h。两组样品在采集过程中均按此间隔取水。取出

水样后立即测定,观察土壤立柱进出水的水质变化,探索土壤对径流污染物的净化能力。测定指标为 COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TN, TP 这 5 项主要指标。COD 量采用重铬酸钾法, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂比色法, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用酚二磺酸分光光度法, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, TP 采用钼酸铵分光光度法<sup>[12-15]</sup>。每个样品测定 3 次取其平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 绿地、裸土对模拟雨水径流污染物的去除效果

土壤水分运动是引起土壤养分淋失迁移的动力条件<sup>[16]</sup>,土壤养分的化学形态和性质是决定其迁移特性的内因,土壤养分随径流的迁移有 2 层含义:一是指土壤内部的可溶性物质随入渗水分垂向迁移;另一方面指土壤入渗能力小于降雨强度时产生地表径流,可溶性物质随地表径流迁移。本试验主要以雨水中主要污染物垂向入渗迁移为主要研究对象,以下分别就裸土和绿地两种渗透类型对径流雨水中主要水质指标在土体中的垂向迁移过程及规律加以分析。

试验过程中渗漏量占入渗总量的 30%~50%,裸土和绿地出现渗漏液的时间均为径流雨水进入土壤柱之后 30 min,裸土的渗漏速度为 17 ml/min,绿地的渗漏速度为 15 ml/min。两种渗透系统对雨水径流的去除效果见表 4。

表 4 绿地系统及裸土系统对各污染物的去除率效果

%

时间/ min	COD		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		TN		TP	
	绿地	裸土	绿地	裸土	绿地	裸土	绿地	裸土	绿地	裸土
20	83.545	54.651	85.121	86.345	48.960	51.163	58.322	49.606	86.450	63.190
40	80.642	60.756	70.586	74.656	46.520	52.307	52.328	42.645	78.930	53.244
60	65.802	57.267	62.972	53.528	53.948	55.737	45.487	34.292	71.409	74.793
80	47.089	44.186	44.977	56.345	56.316	56.022	42.950	36.554	62.009	56.559
100	66.769	65.407	54.781	45.077	52.968	54.309	43.719	28.897	46.969	45.929
120	83.223	69.767	62.280	42.260	51.110	53.166	44.334	29.593	50.729	41.696
150	88.385	70.349	57.781	40.851	48.949	50.849	45.333	30.373	48.849	44.956

表 4 为裸土和绿系统地对雨水径流中污染物的去除率随时间的变化情况。从表中可以看出:两种渗滤系统对污染物的去除趋势基本吻合,对各项污染物指标(硝态氮除外)的去除率也在渗流初期(前 40 min)达到较高值。裸土对 COD 的去除率约为 44%~70%,最大值为 70.35%,平均去除率为 58.43%,绿地对 COD 的去除率为 47%~88%,最大值为 88.38%,平均去除率为 72.33%,绿地在前 1 h 的去除率明显高于裸土。裸土对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, TP 的平均去除率分别为 59.20%, 37.91% 和 56.69%,

绿地对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, TP 的平均去除率分别为 65.22%, 49.31%, 65.06%。整个渗流过程中,绿地和裸土系统对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除效果差异不明显,基本维持在 50%左右。以上数据表明:绿地系统对径流污染物的去除效果优于裸土系统,而且大部分污染物被截留在土壤表层。

土壤表层对 COD, TP, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在初始阶段的去除率较高,主要是因为土壤的吸附、过滤截留作用比较显著,由于渗流时间较短,微生物作用不占优势。在此期间,土壤内部的吸附点位比较充裕,能

将大量的污染物吸附,所以去除效果比较明显。

随着时间的延长,土壤表层的吸附点位逐渐被占据,吸附能力大大降低,土壤对污染物的截留能力也达到一定饱和程度,所以去除率出现逐渐降低的趋势。最后阶段,土壤表层对污染物的去除率又略微升高并且达到平衡状态,此阶段主要是土壤对污染物截留过滤的作用,由于西北地区的黄土的大孔隙性,且粉质颗粒较多,在径流雨水的渗滤过程中,土壤密实度大大增加,同时也增强了土壤对污染物的过滤能力,所以最后阶段土壤对污染物的去除率又呈现略有升高的趋势。

绿地系统土壤对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TP 的去除率在初始阶段达到 70% 以上,除了土壤的过滤截留作用之

外,还包括植物根系对营养盐的吸收以及吸附作用。整个渗滤过程中,两种渗滤系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率一直保持在 50% 左右,这主要是土壤截留作用的结果,因为硝态氮不易被土壤胶体吸附,随水分一起向下迁移,植物在短时间内还没有将硝态氮氮化合成氨基酸和蛋白质等,因此渗流过程中绿地和裸土对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率无明显差异。

## 2.2 雨水径流污染物对土壤性质的影响

为了研究土壤对径流污染物的截留情况,了解去除机制,测定了裸土和绿地的渗滤后的土壤特性,并与之前的原土土壤物理特性进行对比分析,掌握土壤在试验前后的物理性质的变化。表 5 为 3 种土壤层的主要物理性质参数。

表 5 径流雨水渗滤后土壤主要物理特性

土地类型	含水率/ %	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙率/ %	pH 值	电导率/ ( $\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	总氮/ ( $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
原土	7.28	2.65	0.13	55.12	8.16	74.0	54.95	59.24	18.32
裸土	1.70	2.69	0.47	42.70	8.38	106.1	68.60	82.39	19.285
绿地	3.07	2.81	0.32	48.48	8.36	76.7	65.10	39.93	14.043

从表 5 得知试验前后土壤特性的变化如下:渗滤之后土壤的含水率和孔隙率均有所下降,容重反而有所升高,说明土壤颗粒在渗滤过程中变得更加紧实,这与西北地区的黄土结构的粉土颗粒含量多,孔隙大有关。试验前后土壤密度和 pH 值变化不大,说明短时间内径流雨水对土壤的基本环境未造成任何影响。试验之后水中氮的含量由原土的 54.95 mg/kg 分别增加到 65.10 mg/kg(绿地)和 68.60 mg/kg(裸土),均有所增加,但增加量相差不大,说明雨水中的氨氮被土壤所截留,植物对氨氮的固定作用较小;有效磷的含量由原土的 59.23 mg/kg 变化到 82.39 mg/kg(裸土)和 39.93 mg/kg(绿地),有机质的含量由原土的 18.32 mg/kg 变化到 19.28 mg/kg(裸土)和 14.04 mg/kg(绿地),绿地的有效磷含量和有机质含量均比原土的低,而裸土中的有机磷和有机质含量却比原土的高,说明植物对磷和有机质的吸收固定作用比较大,从而导致土壤中的有机质和磷的检测量较低。整体来看,径流雨水在渗透过程中对土壤的物理性质会产生一定影响,其中含水率、氮、磷和有机质变化尤为明显。

## 3 结论

(1) 整体来看,裸土和绿地对污染物的去除趋势是相同的,去除效果主要是非生物作用的结果,绿地对雨水中污染物的去除效果除硝态氮以外其余 4 项

指标均优于裸土。

(2) 处理效果稳定,裸土表层对 COD, TP, TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率分别为: 44%~70%, 41%~74%, 42%~51%, 40%~85%, 46%~56%。带有植被的土壤表层对 COD, TP, TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率分别为: 47%~88%, 46%~86%, 43%~62%, 45%~86%, 42%~56%。

(3) 出水水质除 COD 外,均能满足城市污水处理厂处理排放标准一级 A 标准。

(4) 雨水在渗透过程中对土壤的物理性质会产生一定影响。渗滤后的土壤含水率和孔隙率下降,容重升高,土壤变得更加密实。植物对磷和有机质固定作用比较明显,对氮的固定作用较小。

(5) 城市中建设低势绿地是一种经济而实用的方法,可以在以后的城市规划中推广使用。

### [参 考 文 献]

- [1] 姜凌,秦耀民. 利用土壤层净化雨水补给地下水的试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 94-96.
- [2] 郎新城,王金山,奚茜,等. 城市雨水利用现状及技术分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2009, 28(4): 382-385.
- [3] 吕玲,吴普特,赵西宁,等. 城市雨水利用研究进展与发展趋势[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 118-123.
- [4] 袁建伟,张凌毅. 城市雨水处理与利用系统探讨[J]. 节水灌溉, 2007(5): 49-50.

(下转第 148 页)

在生产建设项目开展前期工作设计立项阶段,在工程进入后续阶段时数据可能会有一些变化,但本次研究就是生产建设项目在开展前期工作设计立项阶段的水土保持分类,因此完全能够满足该阶段分析、评定的要求。

(1) 本文将 31 类生产建设项目划分为 5 个水土流失影响等级:1 级为轻微程度水土流失危害,2 级为较轻程度水土流失危害,3 级为一般程度水土流失危害,4 级为严重程度水土流失危害,5 级为极严重程度水土流失危害。

(2) 本文筛选出国家、省、地(州、市)、县(区、市)共 2 227 个项目,收集每个项目的扰动地表面积、损坏植被面积、土石方挖填总量、永久弃渣量、是否涉预防保护区及地貌类型等 13 项水土保持相关指标。所采用的数据指标均采取了一系列的校检、对比、分析手段,使其尽可能准确。研究中所提取的数据均在相关文件中有详细的阐述,都是经过充分的前期调查、勘查,又经过了方案技术论证和审查,因此所采用的数据较为可靠。依据这些数据划分的生产建设项目水土流失影响等级可以较为准确地反映各行业的水土流失潜在危险。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 马和平. 水土保持方案的审批程序[J]. 中国水土保持, 1997(8):3-36.
- [2] 王安明. 开发建设项目中水土保持方案的管理工作[J]. 浙江水利科技, 1998(S):10-12.
- [3] 姜德文,曹善和. 开发建设项目水土保持设施竣工验收程序和方法[J]. 中国水土保持, 2003(12):10-12.
- [4] 高远,任明. 关于开发建设项目水土保持监督管理体系的思考与建议[J]. 中国水土保持, 2003(3):31-32.
- [5] 姜德文. 开发建设项目水土保持全程管理简述[J]. 中国水土保持, 2004(6):9-10.
- [6] 苗光忠. 提高水土保持监督管理能力之管见[J]. 中国水土保持, 2011(8):8-10.
- [7] 曾大林,王瑞增. 对水土保持监督管理工作有关问题的思考[J]. 中国水土保持, 2011(11):26-27.
- [8] 张小林. 长江流域建设项目水土保持监督管理现状及对策[J]. 人民长江, 2009,140(8):69-71.
- [9] 李木山. 赴美国考察水土保持的报告[J]. 天津:海河水利, 1996(3):22-25.
- [10] Higgitt D L. Land Degradation, Conservation and Globalization: A Mediterranean Perspective[M]//Camarda D, Grassini L. Local Resources and Global Trades: Environments and Agriculture in the Mediterranean Region. Bari: CIHEAM, 2003:71-78.
- [11] Harvey N. Environmental Impact Assessment: Procedures, Practice and Prospects in Australia [M]. Melbourne: Oxford University Press; 1998.
- [12] 鲁胜利. 日本水土保持监督执法[J]. 福建水土保持, 2002,14(1):34-35.
- [13] 刘怡靖. 日本冲绳县赤土流出防止条例与对策简介[J]. 福建水土保持, 2002,14(4):55-58.
- [14] 王克勤,姜德文,高天天,等. 基于层次分析法的生产建设项目水土流失影响综合指数研究[J]. 水土保持通报, 2015,35(3):136-142.
- [5] 徐力刚,张奇,徐进,等. 不同降雨强度对营养盐垂向迁移过程和淋失量的影响[J]. 土壤学报, 2008,45(3):437-444.
- [6] 段永惠,张乃明,张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J]. 土壤学报, 2005,37(1):48-51.
- [7] 陈伟伟,张会敏,黄福贵,等. 城区屋面雨水径流水文水质特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011,22(3):86-88.
- [8] 车武,欧岚,刘红,等. 屋面雨水土壤层渗透净化研究[J]. 给水排水, 2001,2(9):38-41.
- [9] 杨清海,吕淑华,李秀艳,等. 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2008,(2):41-47.
- [10] 袁宏林,陈海清,林原,等. 西安市降雨水质变化规律分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2011,43(3):391-395.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 1999.
- [12] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 李丽,王全金,李忠卫. 四种填料对总磷的静态吸附试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2009,26(4):39-43.
- [14] 崔玉波,董婵,赵立辉,等. 人工湿地填料吸附氮磷性能研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2006(2):7-11.
- [15] 王振. 潜流人工湿地对养猪废水的处理效能及其稳定性研究[D]. 北京:中国科学院城市环境研究所, 2013.
- [16] 何建平,汪宏玲. 北京市城区雨水径流的土壤渗透和净化[J]. 节能与环保, 2005(7):21-23.

(上接第 115 页)