

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第12期 Vol.32 No.12 **2012**

中国生态学学会
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 32 卷 第 12 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

- 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例..... 孙永光,赵冬至,吴 涛,等 (3645)
- 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征..... 张全军,于秀波,钱建鑫,等 (3656)
- 青岛市湿地生态网络评价与构建..... 傅 强,宋 军,毛 锋,等 (3670)
- 大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例..... 叶 春,李春华,王秋光,等 (3681)
- 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态..... 王书敏,何 强,张峻华,等 (3691)
- 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响..... 何先进,吴鹏飞,崔丽巍,等 (3701)
- 枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系..... 姚艳霞,赵文霞,常聚普,等 (3714)
- 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价..... 邹丽丽,陈晓翔,何 莹,等 (3722)
- 温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应 朱晓闻,王 辉,刘 进,等 (3729)
- 鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险..... 赵丽平,杨贵明,赵同科,等 (3737)
- 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系 张俊华,李国栋,南忠仁 (3745)
- DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响 邱临静,郑粉莉,Yin Runsheng (3754)
- 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响..... 郭冠华,陈颖彪,魏建兵,等 (3764)
- 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例 陈 杰,梁国付,丁圣彦 (3773)
- 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例..... 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等 (3782)
- 高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例..... 王录仓,高 静 (3795)
- 太湖湖滨带生态系统健康评价..... 李春华,叶 春,赵晓峰,等 (3806)
- 秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量..... 党坤良,陈俊娴,孙飞翔,等 (3816)
- 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响..... 尤 佳,王文瑞,卢 金,等 (3825)
- 海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择..... 刘晋仙,陶建平,何 泽,等 (3834)
- 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应..... 王振兴,朱锦懋,王 健,等 (3841)
- 基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究 金则新,顾婧婧,李钧敏 (3849)
- 不同径级油松径向生长对气候的响应..... 姜庆彪,赵秀海,高露双,等 (3859)
- 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布..... 袁春明,孟广涛,方向京,等 (3866)
- 巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较..... 胡红玲,张 健,万雪琴,等 (3873)
- 银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响..... 黄激激,胡庭兴,张念念,等 (3883)
- 基于氡示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究..... 孙守家,孟 平,张劲松,等 (3892)
- 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性..... 张显强,曾建军,湛金吾,等 (3902)
- 含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈 琳,谷 洁,高 华,等 (3912)
- 钝叶枥不同性别花的花部形态与传粉特征比较..... 王 茜,邓洪平,丁 博,等 (3921)
- 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性..... 何奇瑾,周广胜 (3931)
- 烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响..... 樊高琼,杨恩年,郑 亭,等 (3940)

专论与综述

- 中国产业共生发展模式的国际比较及对策 石 磊,刘果果,郭思平 (3950)

研究简报

- 吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化 张国坤,卢京花,宋开山,等 (3958)
- 杨树人工林生态系统通量贡献区分析..... 金 莹,张志强,方显瑞,等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-06



封面图说: 鸳鸯——在分类上属雁形目,鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟,鸯指雌鸟,故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处,雌雄偶居,以植物性食物为主,也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间,雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中,用干草和绒羽铺垫,每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟,中国传统文化又赋予它很多美好的寓意,因此,在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

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

DOI: 10.5846/stxb201201060028

王书敏, 何强, 张峻华, 李江. 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态. 生态学报, 2012, 32(12): 3691-3700.

Wang S M, He Q, Zhang J H, Li J. The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphor in stormwater runoff from green roofs. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3691-3700.

绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态

王书敏^{1, 2}, 何 强^{1, *}, 张峻华¹, 李 江¹

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆文理学院, 重庆 402160)

摘要: 为了解绿色屋顶暴雨径流的氮磷浓度分布及赋存形态, 在重庆大学构建了两种绿色屋顶, 于 2009 年 9 月至 2011 年 10 月期间进行了绿色屋顶和对照屋面的暴雨径流水质监测。研究表明, 绿色屋顶暴雨径流 pH 值在 7.7 左右, 氨氮浓度满足地表水环境质量标准Ⅲ类标准; 总氮、总磷、硝酸根的平均浓度分别为 3.6—4.4 mg/L、0.17—0.28 mg/L 和 3.1—3.7 mg/L, 均高于降雨雨水浓度; 与对照屋面暴雨径流相比, 同时期的绿色屋顶暴雨径流中总氮、氨氮和总磷浓度较低, 而硝酸根、磷酸根浓度较高。绿色屋顶暴雨径流水质的季节差异明显, 夏季污染物浓度较低, 而春秋季节污染物浓度较高; 总体上看, 随绿色屋顶运行时间的延长, 暴雨径流中总氮和硝酸根浓度逐渐降低, 而总磷和磷酸盐浓度则呈现出一定的波动性。气象因素、降雨雨水水质与绿色屋顶暴雨径流水质的相关性分析表明, 气温越高、前期干旱时间越长, 越有利于绿色屋顶径流中氨氮浓度的降低; 绿色屋顶径流中的总磷和氨氮主要来自降雨。研究结果为绿色屋顶的科学构建和城市暴雨径流管理提供了重要参考。

关键词: 绿色屋顶; 暴雨径流; 氮磷; 浓度分布; 赋存形态

The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphor in stormwater runoff from green roofs

WANG Shumin^{1, 2}, HE Qiang^{1, *}, ZHANG Junhua¹, LI Jiang¹

1 Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2 Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402160, China

Abstract: With the development of urbanization, urban nonpoint source pollution has become the main reason for deterioration of water quality in receiving water body. Green roof is one of the important technologies for controlling urban nonpoint source pollution, which has been taken as an important component of technical system in many advanced concepts for the management of urban stormwater runoff. Green roofs not only provide many general environmental and associated aesthetic, but also play an important role in increasing the green space in densely populated urban areas. So, with increasing of research interests in vegetated roof, more and more such installations are being built in urban regions. However, the water quality of runoff from green roof has been paid little attention so far, and always been consumed clean. Results from recent studies show that green roofs always become source of some pollutants, especially nitrogen and phosphor. The water quality of green roof runoff can be influenced by many factors, such as green roof media, plants vegetated, rainfall intensity, and so on. As long as the water quality issues remain outside the design phase, there is a large potential for green roofs to become pollution sources. So, it is very important to investigate runoff water quality from green roofs under different environment and installation methods. In this paper, in order to investigate the concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphor in stormwater runoff from green roofs, two types of green roofs were

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07315-001); 重庆市课题 (KJ111204; CSTC, 2010BB1351)

收稿日期: 2012-01-06; 修订日期: 2012-04-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hq0980@126.com

constructed in Chongqing University and the water quality of storm runoff from them and the reference roof were monitored from September 2009 to October 2011. Results show that green roofs can improve pH of rainwater from 5.5 to 7.7, which indicates the rapid neutralization for the acid depositions and an environmental benefit in case roof runoff is directly discharged to natural water recipients. The concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$ in runoff from green roof are lower than the value as requested in standard III of Environmental Quality Standards for Surface Water, so, nitrification occurs when rainwater flows through green roofs. The mean concentrations of TN, TP and $\text{NO}_3^{\text{-}}\text{-N}$ in storm runoff are 3.6—4.4 mg/L, 0.17—0.28 mg/L and 3.1—3.7 mg/L respectively, which are higher than that in rain water. Compared with the water quality of contemporaneous stormwater runoff from reference roof, the concentrations of TN, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP in runoff from green roofs are lower relatively, while the concentrations of $\text{NO}_3^{\text{-}}\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3\text{-}}\text{-P}$ are higher. The water quality of stormwater runoff from green roofs varies significantly with seasons, which is better in summer and worse in spring and autumn. Overall, the concentrations of TN and $\text{NO}_3^{\text{-}}\text{-N}$ in runoff from green roofs decrease gradually when they are operated for long term, while that of TP and $\text{PO}_4^{3\text{-}}\text{-P}$ shows fluctuations. Analysis of Pearson correlations among meteorological factors indicates that the higher temperature and longer drying period, the more decrease of concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$. The TP and $\text{NH}_3\text{-N}$ of runoff in green roofs come from rain water primarily. This study can give an important reference for the construction of green roofs and the management of urban stormwater runoff.

Key Words: green roof; storm runoff; nitrogen and phosphor; concentrations distribution; composition

随着城市化进程的快速推进,原有的大量绿地被城市不透水下垫面取代,给区域正常水环境带来了巨大冲击^[1],研究表明,构建生态化设施是减少这种影响的可行方法^[2]。然而,由于城市区域地价昂贵,且城市建筑屋面在城市建设用地中比重较高(约占城市不透水下垫面总面积的40%—50%),绿色屋顶逐渐成为增加城市绿地面积的重要途径^[3-4]。绿色屋顶具有可观的景观价值^[5]、节能价值^[6]以及较高的暴雨径流消减效率^[7],很多国家出台了相应方案以促进绿色屋顶技术发展^[8]。

一般情况下,绿色屋顶常被认为对于改善屋面暴雨径流水质有重要贡献^[9],然而,现行的屋顶绿化规范并未对绿色屋顶暴雨径流的水质作出说明,这就使得绿色屋顶的暴雨径流水质有了很多不确定性^[10]。绿色屋顶可以通过吸收、转化、过滤等作用降低城市暴雨径流的污染物浓度,但也可能导致污染物从土壤、肥料中释放到水体中。一般情况下,屋顶类型(基质层厚度、基质构成、植被类型)、屋顶年龄、管理措施以及周围环境质量和当地污染源等因素都会对绿色屋顶暴雨径流水质产生影响^[8, 11]。Berndtsson 等^[9]研究了日本福冈和瑞典的绿色屋顶暴雨径流水质特点,发现两地的绿色屋顶均为污染物质的释放源,尤其是溶解性营养盐的释放;Emilsson^[12]跟踪研究了不同植物和构建基质对绿色屋顶暴雨径流水质的影响,结果发现构建基质的初始营养物质含量对植物生长和暴雨径流水质都有影响,且不同植物搭配下绿色屋顶的暴雨径流水质也有区别。Berndtsson 等^[12]在瑞典马尔默和隆德的研究表明,绿色屋顶可以降低氨氮和总氮,但同时是硝酸盐、总磷和磷酸盐的释放源,建成时间短的绿色屋顶更容易成为总氮的释放源。

尽管国外关于绿色屋顶暴雨径流水质的研究已有报道,但基于研究条件、环境背景等因素的不同,研究结果并不一致,绿色屋顶暴雨径流高氮磷浓度的现象被不断重复发现^[13]。有研究表明,绿色屋顶运行1年^[14],甚至几个月^[15],其暴雨径流中的氮磷浓度水平便迅速降低,可能随运行时间的延长,绿色屋顶暴雨径流水质会有所改善。然而,最近的研究发现^[8],并不是所有污染物的浓度均随绿色屋顶年龄的增加而逐渐降低,有些营养性污染物年际浓度呈波动性分布。因此,绿色屋顶暴雨径流水质并非想象中的清洁,不论是暴雨径流水质本身,还是暴雨径流水质的历时演变特性,均存在很大的不确定性,目前的研究中以营养性污染物浓度为目标进行分析的居多,而关于营养性污染物浓度分时分布及赋存形态特点的研究则较少。相对于总氮总磷来说,溶解性无机氮和溶解性磷更容易被生物吸收利用,对水体污染的威胁程度更大,因此,研究绿色屋顶暴雨径流营养性污染物赋存形态的分布更有必要。

绿色屋顶在城市景观中具有多重价值属性,国内很多城市正积极推进绿色屋顶的推广和普及,在此关键时刻,及时了解特定构建方式下绿色屋顶的暴雨径流水质情况,进而思考绿色屋顶的科学构建方式很有迫切性。重庆处于三峡库区环境敏感地带,局部小气候特征显著,本研究在重庆大学构建了两种绿色屋顶,并进行了暴雨径流水质跟踪监测,旨在探讨在目前广泛采用的构建模式条件下,绿色屋顶的暴雨径流氮磷浓度分布特性,分析氮磷污染物赋存形态特点,同时识别影响绿色屋顶暴雨径流水质的主要因素,以为绿色屋顶的更科学构建和城市暴雨径流管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 绿色屋顶构建

两种绿色屋顶建于 2009 年 5 月,位于重庆大学给排水实验楼顶部,构建方法参考了《屋顶绿化设计规范》(DB440300/T 37—2009),构建面积均为 4 m^2 ($2\text{ m} \times 2\text{ m}$),由下往上有以下几层组成:石子排水层(100 mm),砂滤层(100 mm),土工布层以及砂土层(100 mm)。绿色屋顶所种植植物一块为麦冬,自绿色屋顶建成起长势良好;另一块最初铺设人工草皮,由于 2009 年夏季的高温干旱,逐渐枯萎,后为自然生长的接骨草代替。选取绿色屋顶旁边的水泥屋面作为对照屋面,该屋面为 18 m^2 的封闭汇水区域。

1.2 取样与分析方法

每种绿色屋顶和水泥屋面均通过 U-PVC 管与采样容器相连,使降雨产流全部收集在容器中。每场降雨之前,采样容器均用自来水和蒸馏水冲洗干净,并盖好盖子。雨水采集容器为浸泡在盐酸溶液中的大烧杯,使用之前用自来水和蒸馏水冲洗干净,并倒置放置,降雨开始时在楼顶收集雨水。降雨量的测试由安装在楼顶的自动雨量计监测(3554WD, USA)。

在 2009 年 9 月到 2011 年 10 月期间,共监测了 18 场绿色屋顶暴雨径流,所有水样的测试指标包括 pH 值、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。pH 值用 pH 计(HQ11, HACH, USA)测试,其余指标的测试方法均按照《水和废水监测分析方法(第四版)》的要求执行^[16]。

2 结果与分析

2.1 绿色屋顶暴雨径流水质分析

2.1.1 绿色屋顶暴雨径流污染物浓度分析

统计了 18 场降雨中绿色屋顶暴雨径流水质情况,同时列举了相邻水泥屋面 2010 年夏季的两场降雨监测水质(表 1)。由表 1 可知,两块绿色屋顶均有良好的中和能力,雨水经绿色屋顶过滤后 pH 值可从 5.3 提高到 7.7 左右;同时,两块绿色屋顶都有较好的硝化能力,麦冬屋顶(*Ophiopogon Japonicus* Roof, 简称为 OJR)和接骨草屋顶(*Sambucus Chinensis* Roof, 简称为 SCR)暴雨径流中氨氮的平均浓度分别为 0.16 和 0.4 mg/L,满足地表水环境质量标准Ⅲ类标准^[17],且麦冬屋顶的硝化效果优于接骨草屋顶。然而,麦冬屋顶和接骨草屋顶暴雨径流中的总氮、硝酸根、总磷、磷酸根浓度则分别是雨水的 1.9 和 1.6 倍、12.3 和 10.3 倍、1.1 和 1.9 倍、0.8 和 1.3 倍,硝酸根浓度升幅最大。整体上看,麦冬屋顶对磷的控制效果较好,而接骨草屋顶则比较适用于氮的控制。与水泥屋面相比,除氨氮外,绿色屋顶暴雨径流中营养性污染物的浓度均处于较高水平,可能是水泥屋面的监测时间在夏季,暴雨径流的稀释作用降低了污染物浓度的缘故。

表 1 绿色屋顶、水泥屋顶暴雨径流和雨水水质统计

Table 1 Water quality of stormwater runoff from green roofs, concrete roof and rain water

指标 parameters	pH	TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
雨水 Rainwater	5.3±0.5	2.3±1.0	0.3±0.09	1.8±0.5	0.15±0.2	0.06±0.06
麦冬屋顶 OJR	7.7±0.1	4.4±2.3	3.7±2.6	0.16±0.18	0.17±0.2	0.05±0.05
接骨草屋顶 SCR	7.7±0.4	3.6±2.6	3.1±2.6	0.4±0.4	0.28±0.37	0.08±0.07
水泥屋面 Concrete roof	6.5±0.04	3.35±0.09	1.09±0.21	0.44±0.17	0.13±0.04	0.02±0.01

2.1.2 绿色屋顶暴雨径流氮磷形态分析

分析了绿色屋顶暴雨径流中的氮磷形态,如图1所示。总氮包括有机氮(Total Organic Nitrogen,简称TON)和无机氮两部分。雨水中比重最大的是氨氮,占总氮的78%,绿色屋顶暴雨径流中比重最大的是硝酸根,占总氮的84%—86%;同时,两者的共同之处是无机氮(氨氮和硝酸根之和)比重较高(占总氮的88%—97%)。绿色屋顶暴雨径流中的总磷浓度高于雨水,但磷酸盐占总磷的比重(29%)低于雨水(40%)。

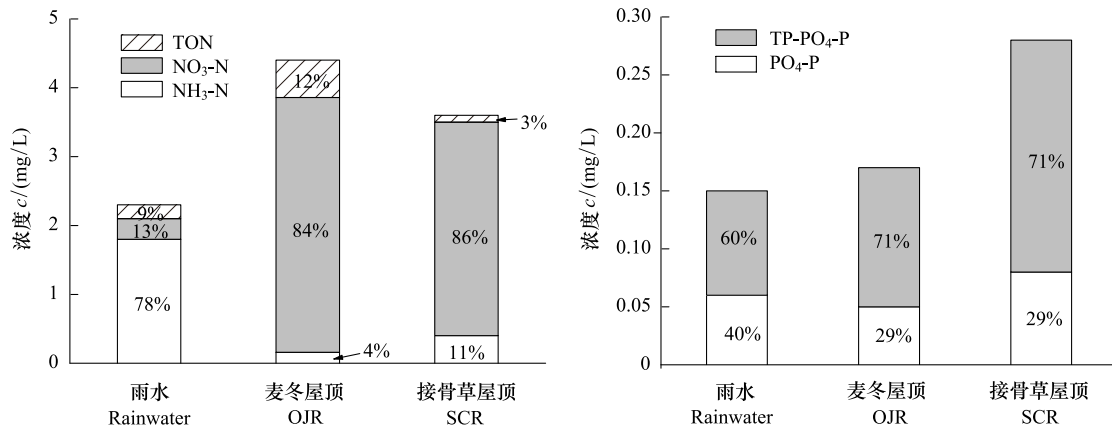


图1 绿色屋顶暴雨径流氮磷形态分析

Fig.1 Analysis of nitrogen and phosphorus species in storm runoff from green roofs

2.2 绿色屋顶暴雨径流水质季节变化

2.2.1 不同季节绿色屋顶暴雨径流污染物浓度

统计了春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)季绿色屋顶暴雨径流的监测水质(图2),其中,在春季监测了3场降雨,夏季监测了6场降雨,秋季监测了9场降雨。由图2可知,雨水中的污染物浓度春季高于夏季,尤其是总氮和氨氮,春季浓度分别是夏季浓度的2.4和1.6倍。麦冬屋顶暴雨径流中总氮总磷浓度夏季最低(分别为2.58和0.08 mg/L)秋季最高(分别为6.5和0.15 mg/L);氨氮浓度为秋季最低(0.13 mg/L)春季最高(0.23 mg/L),这与硝酸根浓度规律恰好相反(秋季为5.9 mg/L,春季为1.3 mg/L)。接骨草屋顶暴雨径流中总氮和硝酸根浓度在春季最低(分别为0.66和0.17 mg/L)秋季最高(分别为5.83和5.25 mg/L),氨氮和总磷则在夏季最低(分别为0.18和0.19 mg/L)秋季最高(分别为0.47和0.37 mg/L)。总体看来,绿色屋顶暴雨径流高污染物浓度多出现在秋季,可能与植物生理活性或雨水的稀释作用有关。同时,与水泥屋面夏季的暴雨径流水质相比(表1),麦冬屋顶和接骨草屋顶暴雨径流中的总氮、硝酸根、氨氮、总磷、磷酸根浓度分别是水泥屋面径流的0.8和0.6倍、1.8和1.4倍、0.4和0.4倍、0.6和0.7倍、1.1和2.0倍。

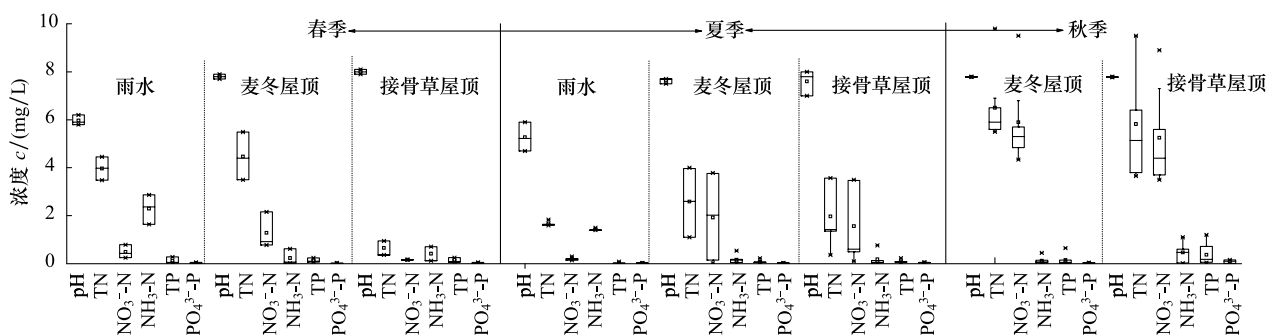


图2 不同季节绿色屋顶暴雨径流污染物浓度

Fig.2 Seasonal pollutant concentrations in storm runoff from green roofs

2.2.2 污染物形态组成变化分析

统计了绿色屋顶暴雨径流中氮磷形态的季节分布特性,如图3所示。由图3可知,对于总氮来说,麦冬屋顶春季暴雨径流中以有机氮为主(占总氮的66%),而接骨草屋顶以无机氮为主(约占总氮的88%),且接骨草屋顶的总氮浓度(0.66 mg/L)远低于麦冬屋顶(4.46 mg/L);在夏秋两季,尽管两块绿色屋顶的总氮浓度有所不同,氮形态分布特性区别不大,均以无机氮为主(占总氮的81%—96%)。对于总磷来说,两块绿色屋顶均是夏季暴雨径流中的磷酸根比重较大(占总磷的25%—44%),但总体来看,磷酸根所占比重季节性波动不大。

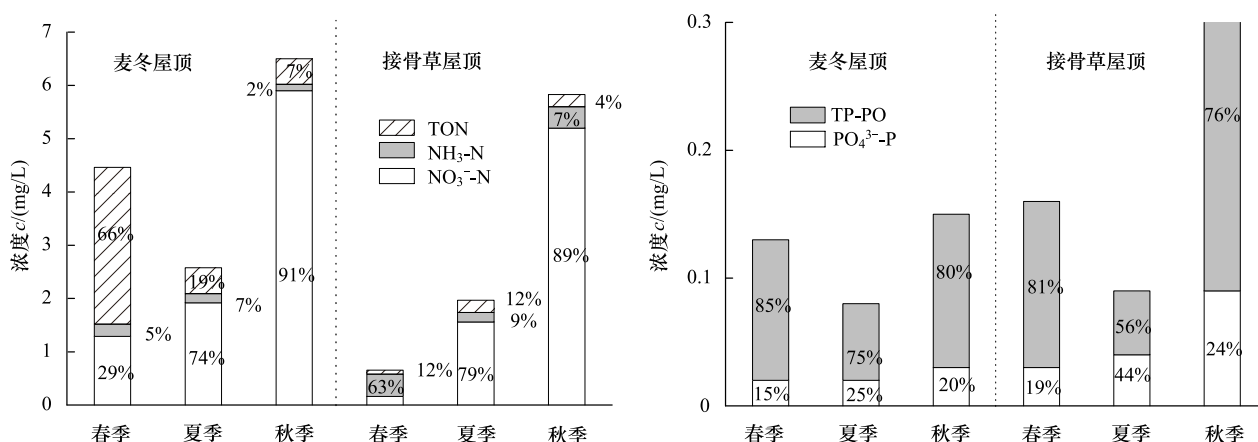


图3 绿色屋顶暴雨径流氮磷形态季节分布

Fig. 3 Seasonal composition of nitrogen and phosphorus in storm runoff from green roofs

2.3 绿色屋顶暴雨径流水质历时演变分析

为分析绿色屋顶暴雨径流水质的历年变化情况,分别统计了两块绿色屋顶2010年和2011年的水质监测数据(图4)。由图4可知,相对于2010年暴雨径流来说,两块绿色屋顶2011年的暴雨径流总氮和硝酸根浓度有所降低,麦冬屋顶总氮和硝酸根浓度的降低幅度分别为33%和49%,接骨草屋顶分别为4%和17%;总磷和氨氮平均浓度则有所升高(接骨草屋顶暴雨径流中的总磷平均浓度除外),麦冬屋顶2011年暴雨径流的总磷(0.24 mg/L)和氨氮(0.76)平均浓度分别是2010年暴雨径流浓度的4倍和1.5倍,接骨草屋顶分别为0.62倍和1.4倍。

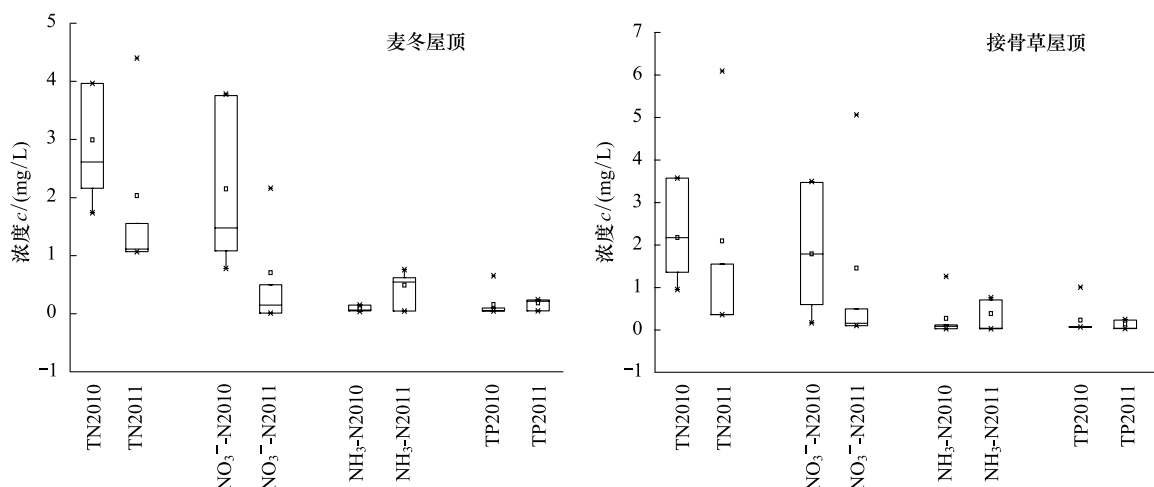


图4 绿色屋顶暴雨径流污染物年均浓度变化

Fig. 4 Variation of pollutant average concentrations in storm runoff from green roofs annually

2.4 暴雨径流水质影响因素分析

为识别影响绿色屋顶暴雨径流水质的主要因素,分别用 SPSS18.0 分析了两块绿色屋顶暴雨径流水质和气象因素(气温、降雨强度、前期干旱期、降雨持续时间和降雨量)、降雨水质之间的皮尔逊相关系数,如表 2、表 3 所示。麦冬屋顶暴雨径流水质和气象因素之间未发现显著相关关系,而接骨草屋顶暴雨径流中的氨氮浓度和气温、前期干旱天数呈显著负相关关系(表 2)。两块绿色屋顶暴雨径流的总磷浓度均和雨水中的总磷浓度呈显著正相关关系,同时,接骨草屋顶中的氨氮浓度还和雨水中的氨氮、总氮浓度呈显著正相关性(表 3)。

表 2 绿色屋顶暴雨径流水质和气象因素相关性分析($n=14$)

Table 2 Analysis of Pearson correlations between meteorological factors and pollutant concentrations in green roof runoff					
	降雨强度/(mm/min) Rainfall intensity	降雨时间/min Rainfall duration	降雨量/mm Rainfall volume	气温/℃ Temperature	前期干旱天数/d Antecedent dry day
麦冬屋顶 OJR					
TN	-0.297	-0.042	-0.145	-0.320	-0.187
NO ₃ -N	-0.286	-0.152	-0.106	-0.173	-0.040
NH ₃ -N	0.451	-0.357	-0.132	-0.109	-0.007
TP	-0.014	-0.323	-0.239	-0.111	-0.222
接骨草屋顶 SCR					
TN	-0.347	0.163	-0.076	-0.224	-0.242
NO ₃ -N	-0.315	0.128	-0.045	-0.140	-0.080
NH ₃ -N	-0.244	-0.291	-0.466	-0.568 *	-0.566 *
TP	-0.287	-0.340	-0.308	-0.310	-0.417

表 3 绿色屋顶暴雨径流水质和雨水水质相关性分析($n=9$)

Table 3 Analysis of Pearson correlations between rain water quality and pollutant concentrations in green roof runoff				
	雨水中 TN TN-Rain	雨水中硝酸根 NO ₃ -N-Rain	雨水中氨氮 NH ₃ -N-Rain	雨水中总磷 TP-Rain
麦冬屋顶 OJR				
TN	0.067	0.257	-0.309	-0.424
NO ₃ -N	-0.192	0.266	-0.210	-0.326
NH ₃ -N	0.299	0.041	-0.274	0.209
TP	0.554	0.369	0.789 *	0.976 **
接骨草屋顶 SCR				
TN	0.094	0.584	0.119	-0.271
NO ₃ -N	0.011	0.515	0.056	-0.252
NH ₃ -N	0.786 *	0.722 *	0.818 **	0.918 **
TP	0.523	0.423	0.832 *	0.954 **

3 讨论

3.1 绿色屋顶暴雨径流水质

绿色屋顶的暴雨径流水质容易被忽视,很多研究表明,多数情况下绿色屋顶往往表现为污染物释放源^[4, 8-9]。本文总结了部分学者对绿色屋顶暴雨径流水质的研究结果,如表 4 所示。由表 4 可知,不同条件下绿色屋顶的暴雨径流水质并不一致。本研究中绿色屋顶暴雨径流总氮、硝酸根、氨氮和总磷平均浓度分别为 3.6—4.4、3.1—3.7、0.16—0.4 和 0.17—0.28 mg/L,水质较日本福岡和瑞典绿色屋顶的水质差^[9],但均在爱沙尼亚绿色屋顶水质范围内^[8]。在美国卡罗莱纳州北部,绿色屋顶径流中总氮的平均浓度为 0.07—6.9mg/L^[18]。由此可知,由于绿色屋顶暴雨径流水质的影响因素众多,使得水质波动性较强,不同学者的研究结果难以一致,有必要深层挖掘相关影响因素,并加以改良,使得绿色屋顶真正成为城市暴雨管理的最佳措施之一。一般情况下,绿色屋顶径流水质被认为优于硬屋面暴雨径流,但对于溶解性营养盐来说,不一定如此。有研究

表明,与硬屋面相比,绿色屋顶径流中的硝酸盐浓度更高^[13];也有研究发现,磷浓度更高^[19]。在加拿大的研究案例则表明,与邻近的不透水屋面相比,绿色屋顶可降低污染物浓度,但不包括钙、镁、总磷^[14]。由此可知,绿色屋顶的构建改变了硬屋面的累积-冲刷规律,使得暴雨径流污染物浓度需要更加深入的研究考量。

表 4 绿色屋顶暴雨径流水质

Table 4 Summary of storm runoff quality from green roofs

地点 Sites	水样 Water samples	pH	TN /(mg/L)	NH ₃ -N /(mg/L)	NO ₃ ⁻ -N /(mg/L)	TP /(mg/L)
爱沙尼亚 Estonia ^[8]	雨水	6.57	0.4	0.1	0.1	0.02
	绿色屋顶	8.06—8.24	0.4—6.4	0.01—2.4	0.005—2.0	0.16—0.64
瑞典 Sweden ^[9]	雨水	6.1	2.8	1.2	1.0	0.05
	浅介质屋顶	6.5	2.31	0.08	0.07	0.31
日本福岡 Fukuoka, Japan ^[9]	雨水	5	2.3	1.0	1.2	0.04
	深介质屋顶	7.5	0.59	0.15	0.11	0.01

土壤介质和施用肥料的组分构成被认为是导致绿色屋顶暴雨径流营养性污染物释放的两个关键因素^[20]。有研究表明,绿色屋顶介质是营养性污染物的来源,径流中的氮磷很可能是从介质中渗沥出来进入暴雨径流的^[18]。Monterusso 等^[21]研究发现,土壤类型和排水系统不同,硝酸盐浓度也不同,介质层最薄的绿色屋顶硝酸盐的释放量最大,绿色屋顶施肥后第 140 天和 314 天,硝酸盐浓度一直在增长。为进一步查明绿色屋顶介质层对暴雨径流水质的影响,Berndtsson 等^[9]在日本用无机轻质土壤构建了深层绿色屋顶,发现该种介质的使用有助于降低总氮浓度。Beck 等^[13]在绿色屋顶介质中添加了生物碳,以提高绿色屋顶介质层对营养盐的滞留能力,发现生物碳的添加有助于改善绿色屋顶暴雨径流水质。Hathaway 等^[18]研究了绿色屋顶构建土壤中有机堆肥构成比例对径流水质的影响,发现有机堆肥比例和出水中氮磷浓度的高低有明显响应关系,有机堆肥比例越高,出水中的氮磷浓度也越高。因此,选取恰当的绿色屋顶构建介质对于暴雨径流水质保障至关重要。在本研究中,绿色屋顶暴雨径流的氮磷浓度较高,可能与选用的土壤类型有很大关系。

植物类型也是影响绿色屋顶径流水质的重要因素。两块绿色屋顶的构建材料相同(种植植物除外),暴雨径流水质却有较大差别,体现出了植物对绿色屋顶雨水净化效果的显著影响。植物对处理效率具有直接和间接作用。直接作用包括有机物的降解、营养元素的吸收以及土壤多孔性的维护等;间接作用主要体现在植物根系对土壤微生物群落的影响。一般说来,景天属植物是绿色屋顶常用的植物类型,但培育本土植物更有必要^[22-23]。麦冬和接骨草均为中国西南地区的常见植物,研究结果为绿色屋顶植物的选用提供了参考。植物对绿色屋顶净化效果的贡献具有季节性,在春季,由于植物处于生长期,尽管温度与秋季相差不大,但绿色屋顶的暴雨径流水质优于秋季,而在秋季,由于植物对营养盐的需求减少,累积的氮被重新释放从而导致绿色屋顶出流水质往往较差(图 2)^[23-24]。

3.2 绿色屋顶暴雨径流水质历时演变

随绿色屋顶运行时间的延长,由于水土流失和植物生长的原因,绿色屋顶介质层和暴雨径流水质特性可能有所变化。Getter 等^[25]研究了绿色屋顶土壤有机质含量随运行时间的变化,结果发现,绿色屋顶运行 5a 后土壤有机质含量由 2% 提高到了 4%。Schrader 和 Böning^[26]在德国的研究表明,与建成年龄短的绿色屋顶相比,老龄绿色屋顶土壤有机质含量、总氮含量均有增加。由于绿色屋顶介质层性质对径流水质有重要影响^[20],随绿色屋顶年龄的增长,其介质层组分的改变可能引起暴雨径流水质的改变。Van 等^[14]在加拿大多伦多的研究表明,绿色屋顶运行 1a 后,暴雨径流中的氮磷浓度得到显著降低,Teemusk 和 Mander^[8]在爱沙尼亚研究了绿色屋顶暴雨径流水质的变化情况,结果发现,绿色屋顶径流 pH 值较稳定,总磷和磷酸根浓度并未随着运行时间延长逐渐降低,年均浓度波动性较大,而总氮和硝酸根则整体上呈下降趋势,这与本研究的研究结果很相似,这可能是由于氮在土壤中容易被转化为硝酸根,而硝酸根难以被土壤持留的缘故。

3.3 绿色屋顶暴雨径流氮磷形态

氮磷是引起水体富营养化的主要元素,研究表明,氮的赋存形态不同,对水体水质恶化的贡献强度也不同,相对于固态氮来说,溶解性无机氮更容易被简单生物体吸收利用,从而引起水体的富营养化问题^[27]。因此,了解绿色屋顶暴雨径流中氮磷的赋存形态对于深入了解其对水环境的作用有重要意义。由图 1 和图 3 可知,在本研究中,绿色屋顶暴雨径流中的大部分氮以无机氮形式存在(81%—97%,除麦冬屋顶春季水质外),且无机氮中主要以硝酸根的形式存在。硝酸根是带负电荷阴离子,在土壤中非常容易流动,在早期好氧条件下,硝化菌和亚硝化菌容易将土壤中的氨氮或有机氮转化成硝态氮,转化成的硝态氮将在介质中积累,降雨时,累积的硝酸根便从介质中释放出来^[28-29],由于绿色屋顶系统中不具备传统的反硝化脱氮要求的反应条件,硝酸盐的去除可能对植物吸收的依赖程度比较大,这可能是硝酸盐控制效果不稳定的原因之一。雨水中 91% 的氮以无机氮的形式存在,且总氮中的 78% 为氨氮(图 1),绿色屋顶可能只完成了氮赋存形态的转化而未能脱除氮。绿色屋顶暴雨径流中磷酸根所占总磷比例均在 44% 以内,相对比较稳定(图 1、图 3),总磷的去除主要依靠植物吸收和绿色屋顶系统的物理截留,有研究发现溶解性磷酸盐比总磷浓度小得多^[30],也有研究显示绿色屋顶径流中的总磷大多数为磷酸盐^[31]。日本福冈和瑞典地区绿色屋顶暴雨径流中无机氮所占总氮比例分别为 44% 和 6%,远低于本研究结果(表 4);而爱沙尼亚地区无机氮所占比例平均为 51% (0.3%—82.5%),磷酸根浓度占总磷浓度的比重平均为 73% (56%—98%)。由此可知,不同地区的绿色屋顶,不仅暴雨径流中氮磷的浓度不一致,而且氮磷赋存形态也不一致,这可能与种植植物、构建介质的理化性质有重要关系。

3.4 气象因素和降雨雨水水质对绿色屋顶出流水质的影响

两块绿色屋顶暴雨径流水质与气象因素和降雨水质的相关性不完全一致(表 2、表 3),表明绿色屋顶系统净化雨水的复杂性和植物对绿色屋顶运行效果影响的显著性。接骨草屋顶暴雨径流中的氨氮浓度与气温、前期干旱天数均呈显著负相关。氨氮是水溶性阳离子,可被土壤中带负电荷的粘土或有机物通过吸附或离子交换固定^[32],温度升高有利于氨氮的转化或者接骨草对氨氮的吸收,这可能是造成氨氮浓度和气温、前期干旱天数呈显著负相关的重要原因。绿色屋顶径流中的总磷浓度与雨水中的总磷浓度呈显著正相关关系,表明绿色屋顶雨天出流中的磷主要来源于天然降雨。同时,接骨草屋顶暴雨径流的氨氮与雨水中的氨氮浓度也呈正相关关系,表明雨水中的氨氮浓度对绿色屋顶出流中的氨氮浓度有显著影响。

4 结论

(1) 在本研究中,绿色屋顶的暴雨径流水质与雨水水质相比,除对 pH 值和氨氮有较好的中和和降解转化效率外,暴雨径流中的总氮、总磷、硝酸根浓度均高于雨水;与水泥屋面暴雨径流水质相比,同时期的绿色屋顶暴雨径流中总氮、氨氮和总磷浓度低于水泥屋面,而硝酸根、磷酸根浓度则高于水泥屋面。

(2) 绿色屋顶暴雨径流水质的季节差异明显,夏季污染物浓度较低,而春秋季节污染物浓度较高,尤其是秋季,同时,绿色屋顶运行时间也对暴雨径流水质有重要影响,随运行时间的延长,总氮和硝酸根浓度逐渐降低,而总磷和磷酸盐浓度则呈现出一定的波动性。

(3) 气象因素、降雨雨水水质与绿色屋顶暴雨径流水质的相关性分析表明,气温越高、前期干旱时间越长,越有利于绿色屋顶径流中氨氮浓度的降低,同时,绿色屋顶径流中的总磷和氨氮主要来自降雨中的总磷和氨氮。

References:

- [1] Zhang B, Xie G D, Xue K, Wang J Z, Xiao Y, Zhang C Q. Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3839-3845.
- [2] Guo Q H, Ma K M, Zhao J Z, Yang L, Yin C Q. A landscape ecological approach for urban non-point source pollution control. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 977-981.
- [3] Palla A, Gnecco I, Lanza L G. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of*

- Hydrology, 2009, 379(1/2): 193-204.
- [4] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351-360.
- [5] Wang J L. A Study of the color compatibility of the crassulaceae plants in roof greening in Central Shanxi Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(19): 201-205.
- [6] Tang M F, Zheng S K, Yang Z J. Thermal performance and energy analysis of green roof. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2010, 32(2): 87-90.
- [7] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(3): 217-226.
- [8] Teemusk A, Mander Ü. The influence of green roofs on runoff water quality: a case study from Estonia. *Water Resources Management*, 2011, 25(14): 3699-3713.
- [9] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 369-380.
- [10] Wang S M, Yu H, Zhang B. A review of the research on eco-technologies for control of urban nonpoint source pollution. *Shanghai Environmental Sciences*, 2011, 30(4): 168-173.
- [11] Berndtsson J C, Emilsson T, Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 2006, 355(1/3): 48-63.
- [12] Emilsson T. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, 2008, 33(3/4): 265-277.
- [13] Beck D A, Johnson G R, Spolek G A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2111-2118.
- [14] van Seters T, Rocha L, MacMillan G. Evaluation of the runoff quantity and quality performance of an extensive green roof in Toronto, Ontario// *Proceedings of the Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Minneapolis, 2007.
- [15] Hunt W F, Hathaway A M, Smith J T, Calabria J. Choosing the right green roof media for water quality// *Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Boston, 2006.
- [16] State Environment Protection Administration of China. *Analyse Methods for Monitoring Water and Wastewater (4th ed)*. Beijing: Environmental Science Press, 2002.
- [17] State Environmental Protection Administration of China. *Environmental Quality Standards for Surface Water*. Beijing: Environmental Science Press, 2002.
- [18] Hathaway A M, Hunt W F, Jennings G D. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(1): 37-44.
- [19] Berghage R D, Beattie D, Jarrett A R, O'Connor T P. Green roof runoff water quality// *Proceedings of the Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Minneapolis, 2007.
- [20] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 963-969.
- [21] Monterusso M A, Rowe D B, Rugh C L, Russell D K. Runoff water quantity and quality from green roof systems. *Acta Horticulturae*, 2004, 639: 369-376.
- [22] Dvorak B, Volder A. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 197-213.
- [23] Wolf D, Lundholm J T. Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*, 2008, 33(2): 179-186.
- [24] Lucas W C, Greenway M. Hydraulic response and nitrogen retention in bioretention mesocosms with regulated outlets: part II-nitrogen retention. *Water Environment Research*, 2011, 83(8): 703-713.
- [25] Getter K L, Rowe D B, Andresen J A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 2007, 31(4): 225-231.
- [26] Schrader S, Böning M. Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans. *Pedobiologia*, 2006,

50(4): 347-356.

- [27] Seitzinger S P, Sanders R W, Styles R. Bioavailability of DON from natural and anthropogenic sources to estuarine plankton. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(2): 353-366.
- [28] Blecken G T, Zinger Y, Deletić A, Fletcher T D, Hedström A, Viklander M. Laboratory study on stormwater biofiltration: nutrient and sediment removal in cold temperatures. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3/4): 507-514.
- [29] Lucas W C, Greenway M. Nutrient retention in vegetated and nonvegetated bioretention mesocosms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(5): 613-623.
- [30] Teemusk A, Mander Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 271-277.
- [31] Berndtsson J C, Emilsson T, Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 2006, 355(1/3): 48-63.
- [32] Hsieh C H, Davis A P, Needelman B A. Nitrogen removal from urban stormwater runoff through layered bioretention columns. *Water Environment Research*, 2007, 79(12): 2404-2411.

参考文献:

- [1] 张彪, 谢高地, 薛康, 王金增, 肖玉, 张灿强. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估. *生态学报*, 2011, 31(13): 3839-3845.
- [2] 郭青海, 马克明, 赵景柱, 杨柳, 尹澄清. 城市非点源污染控制的景观生态学途径. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 977-981.
- [5] 王军利. 关中地区屋顶绿化中景天科植物色彩搭配的相融性研究. *中国农学通报*, 2010, 26(19): 201-205.
- [6] 唐鸣放, 郑澍奎, 杨真静. 屋顶绿化节能热工评价. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2): 87-90.
- [10] 王书敏, 于慧, 张彬. 城市面源污染生态控制技术研究进展. *上海环境科学*. 2011, 30(4): 168-172.
- [16] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法 (第四版). 北京: 环境科学出版社, 2002.
- [17] 国家环保总局. 地表水环境质量标准. 北京: 环境科学出版社, 2002.

CONTENTS

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland	ZHANG Qianjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff from green roofs	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker)	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration: a case study of Gongyi City	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level: a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathartii</i>	YUAN Chunming, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i>	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat	FAN Gaoqiong, YANG Ennian, ZHENG Ting, et al (3940)
Review and Monograph	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
Scientific Note	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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 70.00 元