

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201706003

引文格式: 周雄丽, 吴富勤, 杨冠松, 等. 滇池流域退耕区植物群落构建对地表径流污染物的削减效应 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 727–736

ZHOU XL, WU FQ, YANG GS, et al. Effects of plant community establishment on surface runoff pollutant reduction of abandoned farmland area in Dianchi Lake basin [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 727–736

滇池流域退耕区植物群落构建对地表径流污染物的削减效应

周雄丽¹, 吴富勤^{1,2}, 杨冠松^{1,2}, 和树庄³, 王跃华¹, 申仕康^{1*}

(1. 云南大学 生命科学学院, 昆明 650091; 2. 云南省林业调查规划院 云南省自然保护区研究监测中心, 昆明 650051; 3. 云南大学 生态学与环境学院, 昆明 650091)

摘要: 为探索不同群落的构建在滇池流域的实际应用, 以确定削减污染物最优植物群落的配置方式, 该研究选取地表径流悬浮物(SS)、COD含量、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N) 六个指标作为主要的分析对象, 在滇池流域退耕区开展了不同植物群落配置对地表径流污染物削减效应的试验研究。结果表明: 三个植物群落对SS、COD、TN、TP、NO₃⁻-N在2014年和2015年间均表现出显著性的削减趋势, 且三个植物群落对SS、TP和NO₃⁻-N的削减率均在45%以上, 但并未对NH₄⁺-N表现出削减效果。不同植物群落对污染物的削减效应存在一定的差异性, 但是三个不同群落与年度的交互作用对SS、COD、TN、TP、NO₃⁻-N五个养分指标的削减并没有表现出显著的差异性。从整体上来看, 三种植物群落类型中, 以乔-灌-草构建的立体式植物群落对地表径流污染物的削减效果最佳。

关键词: 滇池流域, 退耕区, 植物群落, 地表径流, 污染物输出, 生态恢复

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)06-0727-10

Effects of plant community establishment on surface runoff pollutant reduction of abandoned farmland area in Dianchi Lake basin

ZHOU Xiongli¹, WU Fuqin^{1,2}, YANG Guansong^{1,2}, HE Shuzhuang³,
WANG Yuehua¹, SHEN Shikang^{1*}

(1. School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Research and Monitoring Center of Nature Reserve, Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China; 3. School of Ecology and Environment Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Dianchi Lake basin is the largest shallow water lake on the Yunnan-Guizhou Plateau. It is crucial to maintain the ecological and environmental sustainable development of Yunnan Province. In the present study, three different plant

收稿日期: 2017-08-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-003); 国家自然科学基金(31560224) [Supported by Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2012ZX07102-003); the National Natural Science Foundation of China(31560224)].

作者简介: 周雄丽(1992-), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 研究方向为生物多样性保护, (E-mail) 1040488905@qq.com。

*通信作者: 申仕康, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为植物种质保护与系统进化, (E-mail) yunda123456@126.com。

communities were established in Dianchi Lake basin to analyze the effects of plant community on the surface runoff pollutant reduction of abandoned farmland area. The experiment aimed to explore the practical application and determine the optimal configuration of plant communities in reducing pollutants in Dianchi Lake basin. Six indicators which include suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) were selected in the present study. The results showed that the indicators of SS, COD, TN, TP and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were significantly reduced between 2014 and 2015 regardless of the plant community types. The average reduction rates reached 45% for SS, TP and $\text{NO}_3^-\text{-N}$. However, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was not effectively reduced. There were some differences to reduce the pollutant among different plant communities. However, the interaction between different communities and annual reduction for SS, COD, TN, TP, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ did not show significant differences. It was suggested that plant species selection and their spatial allocations had great significance in the bio-treatment of polluted lakes and the ecological recovery of abandoned farmland area in Dianchi Lake basin. On the whole, it can be concluded that the plant community of arbor-shrub-herb has the best effects on reducing pollutants of surface runoff in Dianchi Lake basin. Therefore, we suggest that the plant community of arbor-shrub-herb should be prioritized application in the ecological restoration and recovery of Dianchi Lake basin. This study on the plant community establishment and its effect on surface runoff pollutant reduction in abandoned farmland area of plateau lake can provide scientific information for nonpoint pollution control, ecological restoration and recovery.

Key words: Dianchi Lake basin, abandoned farmland area, plant community, surface runoff, pollutant output, ecological restoration

滇池是云南省第一高原断陷型淡水湖泊,位于昆明市西南,东邻滇北高原,西有横断山脉,北靠乌蒙山,流域面积2 920 km²(刘松波,2013)。滇池流域处于长江、珠江、红河三大水系的分水岭地带,属于长江流域金沙江水系(陈春榆等,2012)。20世纪70年代,滇池水质良好,具有丰富的生物多样性,而到了90年代,滇池出现了严重的富营养化(桂萌等,2003)。近年来,对滇池湖体和湖滨带实施了一系列综合治理措施(郭怀成等,2002)。桂萌等(2003)研究认为,滇池的点源污染已得到有效控制,但面源污染入湖N、P的比例逐渐增大,控制农业面源污染已成为解决滇池富营养化问题的关键。滇池流域有着数万公顷的农田,耕地面积(636.4 km²)占流域土地总面积的21.9%(陈春榆等,2012)。刘松波(2013)对滇池流域土地利用变化研究结果显示,耕地是滇池东南岸入湖水体污染物的主要来源。王娅等(2013)在不同土壤利用方式对溶解性有机碳流失特性研究中发现,退耕区对COD的溶出率仅次于大棚。退耕区虽然是停止耕种一段时间的耕地,但曾经频繁的耕作,导致土壤没有足够的修复时间。故农业面源导致的径流污染等仍然是滇池流域面源污染物主要来源

(郭怀成和孙延枫,2002)。

湖滨带在物理、化学、生物过程的作用下,通过水-土壤(沉积物)-植物系统的过滤、渗透、吸收、滞留、沉积等作用,控制或减少地表径流中的固体悬浮颗粒、溶解性污染物,改善土壤渗透性,以达到降解环境污染、净化水质的目的(颜昌宙等,2005),其中植物系统占主导作用。植物对一定量的营养物质、污染物的吸收和削减作用效果明显(金卫红等,2007),且不同植物种类和群落配置对污染物的防治存在着差异性(黄余春等,2012;汤家喜等,2016)。Correll(2005)的研究表明,草本类的植物具有生长密集、覆盖于地表的特点,能有效地滞缓径流,降解、吸收沉积污染物质;有学者亦认为,滨岸缓冲带对面源污染防治效果取决于前端草本植被缓冲带(Greenway, 2003; Shirley, 2006; 黄沈发等,2008);而汤家喜等(2016)研究结果则显示,乔-灌-草的合理配置能最有效的削减地表径流的污染物。滇池流域面源污染的重要区域为湖滨退耕区(芮艳兰,2016),但有关滇池流域退耕区植物群落构建对地表径流污染物削减的相关研究则鲜有报道。

本研究选择滇池流域滇源一带的退耕区作为

试验样地,通过构建不同类型的植物群落,开展不同植物群落类型对退耕区地表径流污染物,特别是总氮、总磷、化学需氧量等削减效应的试验研究,旨在探讨不同群落的构建在滇池流域的实际应用,确定最优的植物群落配置方式,为滇池流域退耕区的植物群落构建提供科学和理论依据,也为滇池流域退耕还林工程生态效益评价提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 样地设计

选择在滇池流域滇源一带的退耕区,该区域为滇池流域规划中实行退耕还林的区域,选择该区域内退耕 3 a 后仍然裸露的样地开展人工群落构建,群落面积按照 10 m × 10 m 的面积配置植物,共构建三种植物群落类型,每种植物群落设置 3 个重复。为防止各个径流小区互相干扰,使用 30 cm 高的水泥隔板对每个径流小区的四周进行隔离,通过小区下方的 VCP 管将径流小区的径流引入水桶,用盖遮蔽水桶口,防止外来雨水进入(付登高等,2013)。在种植植被之前,先进行翻地平整,清除杂草,将 3 块小样地调整为统一的试验条件,在每个径流小区下放置 100 L 水桶收集地表径流,并于径流结束后采集约 500 mL 的水样,带回实验室进行相关指标测定。

1.2 植物群落构建

依据最接近自然群落的构建理念,在筛选方便管理的适用植物种类的基础上,考虑植物群落的稳定性,该研究构建了乔-灌-草、灌-草、灌-草(自然恢复)三个不同类型的人工植物群落,构建植物群落的植物物种以乡土植物为主,每个群落有具体的物种配置。(1)乔-灌-草植物群落:乔木层选择阔叶树种与针叶树种搭配,其中阔叶树种为枇杷(*Eriobotrya japonica*)、滇朴(*Celtis tetrandra*),针叶树种为柏木(*Cupressus funebris*)、藏柏(*Sabina squamata*);灌木层植物选择火棘(*Pyracantha fortuneana*)、红叶石楠(*Photinia fraseri*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、迷迭香(*Rosmarinus officinalis*)和云南含笑(*Michelia yunnanensis*);草本层植

物选择吉祥草(*Reineckia carnea*)、金边吊兰(*Chlorophytum comosum*)、杭白菊(*Dendranthema morifolium*)。群落构建时保持群落中乔木层盖度 20%~25%,灌木层盖度 35%~40%,草本层盖度 85%~90%。(2)灌-草植物群落:灌木层植物选择火棘(*Pyracantha fortuneana*)、红叶石楠(*Photinia fraseri*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、金银花(*Lonicera japonica*)、迷迭香(*Rosmarinus officinalis*);草本层植物选择吉祥草(*Reineckia carnea*)、杭白菊(*Dendranthema morifolium*)。群落构建时保持群落中灌木层盖度 35%~40%,草本层盖度 85%~90%。(3)灌-草(自然恢复)植物群落:这类群落构建从节约成本的角度考虑,选择依托土壤种子库技术进行草本层的自然恢复,灌木层人工配置植物,选择植物为女贞(*Ligustrum lucidum*)、红叶石楠(*Photinia fraseri*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)。其中,灌木层盖度为 35%~40%,草本层盖度则随年度变化而变化。三种植物群落构建时,乔木采用孤植方式,灌木采用列植和丛植,草本和地被植物则采用丛植和片植方式进行,乔木株行距为 2 m × 2 m~4 m × 4 m,灌木株行距为 1 m × 1 m~2 m × 2 m,对于小型灌木,株行距适当小一点。

1.3 取样与监测方法

植物群落构建基本稳定后,即群落中植物存活与正常生长时进行地表径流的取样与监测。于 2014 年 5 月 2 日第一次暴雨后开始收集地表径流,对每次暴雨所产生的地表径流进行采集,采样时间至 2015 年 10 月 12 日结束,在 2014 年度和 2015 年度分别采集了 8 次暴雨后的地表径流水样,共计 16 次。每次暴雨后采集的径流水样,在 48 h 内对监测指标进行分析测试。试验选择水质评价监测指标为地表径流悬浮物(SS)、COD 含量、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)。各指标测试分析方法如下:SS 采用重量法,化学需氧量(COD)采用重铬酸钾法,氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂法,总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法,硝态氮(NO₃⁻-N)的分析方法采用紫外分光光度法测定,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,具体步骤参照《水和废水

监测分析方法》(国家环境保护总局,2002)。

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件进行整理与统计,用 SPSS 22.0 统计软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 以确定不同植物群落和年度对地表径流污染物输出是否存在差异,对差异达到显著的变量采用最少显著差数法 (least significant differences, LSD) 进行均数的多重比较,选择概率为 0.05 的显著性水平。通过双因素方差分析检测不同植物群落与监测年度的交互作用对地表径流削减作用的影响。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落对地表径流悬浮物 (SS) 的影响

不同植物群落构建对地表径流 SS 含量有削减作用,地表径流 SS 随时间的变化如图 1 所示。在 16 次暴雨后采集的径流水样分析显示,地表径流 SS 含量呈波动状态,并且在三个不同植物群落并未表现出明显的规律性。9 月 23 日三个群落 SS 的削减率异常降低,这可能受降雨后地表径流量大小的影响,其与陈澍等 (2015) 研究相似。但整体来看,2015 年度地表径流 SS 含量低于 2014 年度,不同植物群落对地表径流 SS 的影响不同,其中乔-灌-草群落对 SS 的削减率为 67.40%,灌-草和灌-草 (自然恢复) 的削减率分别为 55.26%、73.55%。

2.2 不同植物群落对地表径流 COD 的影响

三个植物群落中 COD 的含量在 2 a 的试验周期内整体上呈下降趋势,但 COD 的含量随着时间的变化而呈现不规则的波动,表明试验构建的三个不同植物群落均对 COD 有削减作用。三个不同植物群落均在雨季来临之前 COD 含量较高,但在雨季及雨季后,COD 含量明显下降,即初期降雨的径流污染物含量最高,这一现象可能与降雨初期冲刷效应有关 (邓娜等,2011)。不同植物群落 COD 含量的整体变化趋势基本相同,但在各群落之间也存在差异,三个不同群落对 COD 的削减率依次为乔-灌-草 34.74%、灌-草 22.11%、灌-草 (自然恢复) 24.49%,即立体式植物群落的构建对

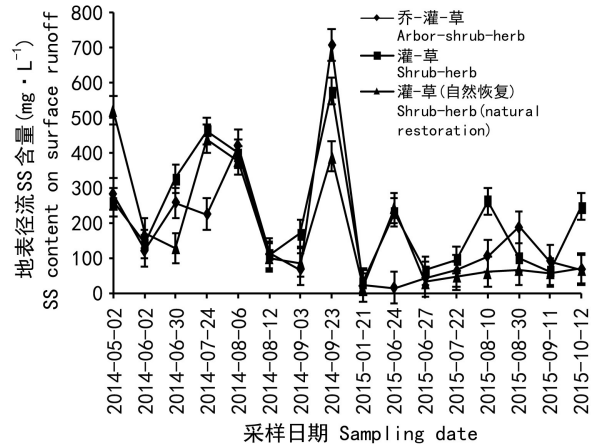


图 1 不同植物群落中 SS 含量变化

Fig. 1 Changes of SS contents in different plant communities

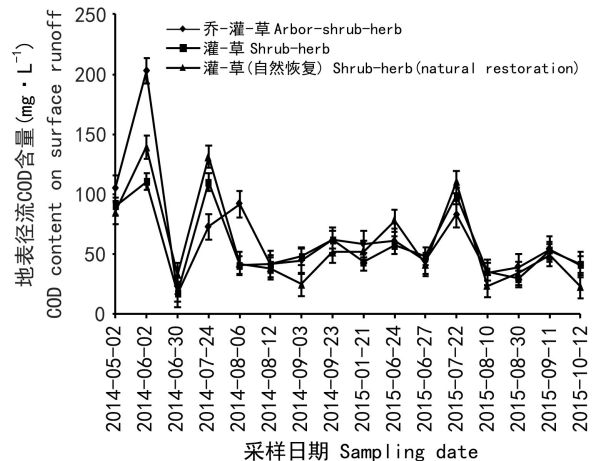


图 2 不同植物群落中 COD 含量变化

Fig. 2 Changes of COD contents in different plant communities

地表径流 COD 的削减效果最好,其次分别是灌-草 (自然恢复) 和灌-草群落。

2.3 不同植物群落对地表径流 TP 的影响

图 3 为三种植物群落下地表径流 TP 在 2014—2015 年间的含量变化。从图 3 可以看出,不同植物群落 2015 年地表径流的 TP 较 2014 年呈现出明显的降低趋势,但在 2014 年,地表径流 TP 含量表现出逐步上升的变化趋势,这可能与群

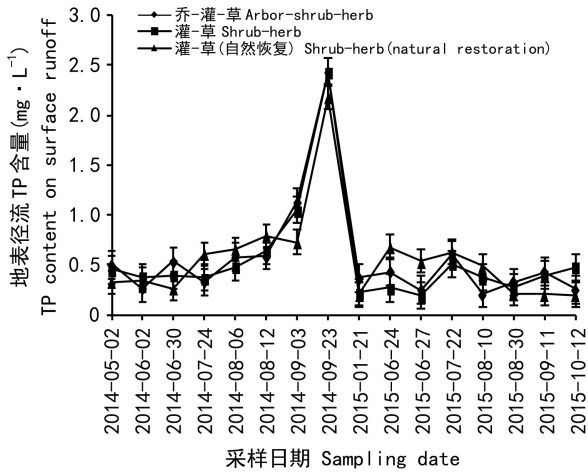


图3 不同植物群落中 TP 含量变化

Fig. 3 Changes of TP contents in different plant communities

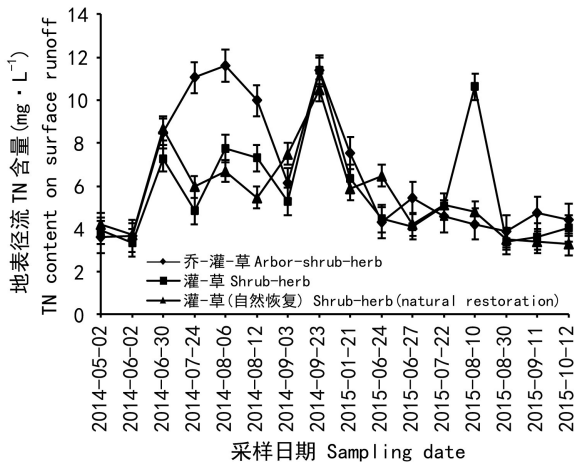
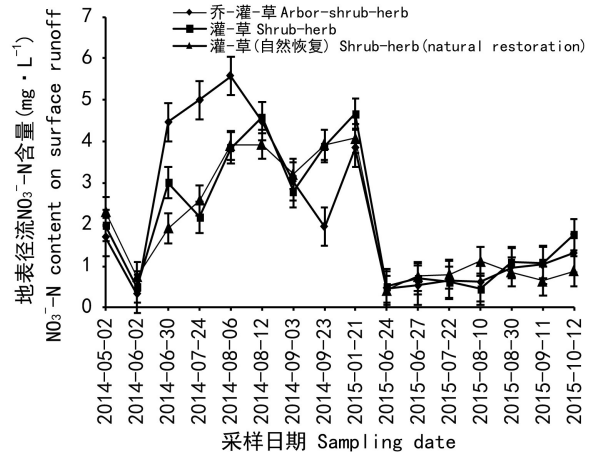
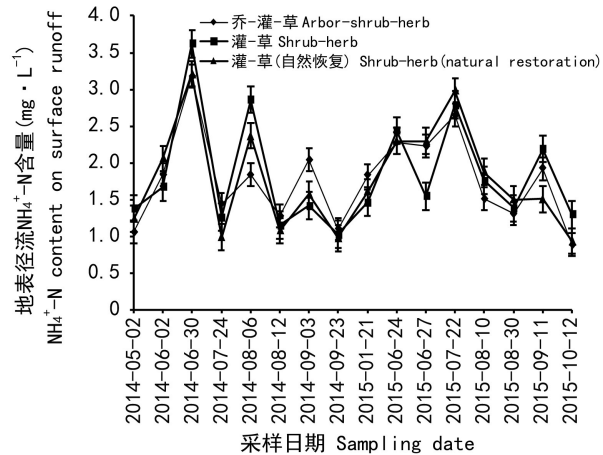


图4 不同植物群落中 TN 含量变化

Fig. 4 Changes of TN contents in different plant communities

图5 不同植物群落中 NO₃⁻-N 含量变化Fig. 5 Changes of NO₃⁻-N contents in different plant communities图6 不同植物群落中 NH₄⁺-N 含量变化Fig. 6 Changes of NH₄⁺-N contents in different plant communities

落构建补充植物材料过程中对地表的扰动有关。2015 年期间,三个不同植物群落地表径流 TP 的变化趋势基本相同,乔-灌-草、灌-草和灌-草(自然恢复)三个植物群落对地表径流 TP 的削减率分别为 55.00%、55.84%、45.95%。9 月 23 日 TP 的削减率也出现异常降低,与 SS 一样,可能受暴雨后地表径流量影响(陈澍等,2015)。

2.4 不同植物群落对地表径流氮含量的影响

2.4.1 对总氮(TN)的影响 三个不同植物群落对地表径流 TN 含量整体上表现出一定的削减作用

(图4),但不同植物群落不同取样时间上仍然表现出了较大的波动性,三个不同群落 2014—2015 年期间对地表径流 TN 含量的削减率分别为 40.58%、18.34%、30.40%,即乔-灌-草群落>灌-草(自然恢复)群落>灌-草群落。这表明乔-灌-草群落对地表径流的 TN 的削减效果最好,灌-草群落对 TN 的削减率相对较小。

2.4.2 对硝氮(NO₃⁻-N)的影响 与 TN 含量的变化

趋势相似,三个不同植物群落对地表径流 NO_3^- -N的影响出现了一定的波动性,但总体上表现为先升高后降低的趋势(图5)。地表径流 NO_3^- -N含量在2014年内总体呈上升趋势且稳定保持高值状态,但在2015年初出现急剧下降后保持相对稳定变化趋势。乔-灌-草、灌-草和灌-草(自然恢复)三个不同植物群落在2014—2015年期间对地表径流 NO_3^- -N的削减率依次为64.46%、52.11%、57.30%,即三个不同植物群落对地表径流 NO_3^- -N的削减率都在50%以上,表明植物群落构建对地表径流的 NO_3^- -N具有明显的削减效果。

2.4.3 对氨氮(NH_4^+ -N)的影响 如图6所示,在2014—2015年试验期间,不同植物群落构建并未表现出对地表径流 NH_4^+ -N的有效削减现象,且在试验期间呈先升后降的不稳定波动状态,这可能与地表径流中的重金属离子含量有关(周金娥和唐立峰,2009)。但是,就年度变化来看,2014年和2015年均表现出随时间的增长而逐步降低的趋势。三个不同植物群落对 NH_4^+ -N虽没有表现出有效的削减效果,但在维持和提高地表径流 NH_4^+ -N含量的作用上却存在一定的差异性,即灌-草(-3.33%)>乔-灌-草(-5.81%)>灌-草(自然恢复,-11.24%)。

2.5 滇池退耕区不同植物群落对地表径流影响的对比分析

通过对乔-灌-草、灌-草和灌-草(自然恢复)三个不同植物群落在2014—2015年期间地表径流不同污染物输出的比较及削减率计算表明,除氨氮 NH_4^+ -N外,其它指标如悬浮物SS、COD、TN、TP和 NO_3^- -N均表现出明显的削减效果,其中三个群落类型对SS、TP和 NO_3^- -N的削减率均达到了45%以上(表1)。从整体来看,三种植物群落类型中,以乔-灌-草构建的立体式植物群落对地表径流的削减效果最佳。

对三个植物群落类型在2014年和2015年度的地表径流养分输出方差分析表明,除了氨氮(NH_4^+ -N)以外,三个植物群落类型的其他5个指标(SS、COD、TN、TP、 NO_3^- -N)在2014年和2015年度间均表现出显著性的削减趋势($P<0.001$),但除

了总氮(TN)外,三个不同群落之间以及群落与年度的交互作用对其他5个养分指标的削减并没有表现出显著的差异性(表2)。试验构建的三个植物群落类型均在可以随着时间的增加而显著削减地表径流的污染物输出,但三个群落之间的差异性以及群落与年度的交互作用对地表径流养分输出的削减效应并不明显。

3 讨论与结论

熊飞等(2005)的研究结果显示,构建的三个不同植物群落对地表径流污染物有较强的削减能力,故表明构建的植物对地表径流污染物的净化作用十分明显。但是,不同的植物群落的削减效果不同,这可能是因为不同植物的不同生长期、叶冠截留、根系吸收能力、以及由植物引起的土壤理化性质变化及其不同根系状况引起的微生物和酶的不同空间分布所致(李明,2012)。从整体来看,以乔-灌-草不同植物构建的立体式群落对地表径流污染物削减效果最好。这可能是由于乔木和灌木有发达的侧根系和不定根,与草本植物的须根系形成纵横交错的根系网,为微生物提供了附着物和充足的氧气(熊飞等,2005)。相较于灌-草群落,乔-灌-草群落中乔木冠层遮盖部分地表,充分发挥了冠层的截留作用,且具有较高的地上和地下生物量、物种多样性更为丰富、物种间相互作用、生态环境系统更为复杂等特点。

汤家喜等(2016)研究表明,SS削减效果主要受到植物群落对地表径流的截留效率的影响。本研究结果发现,三个不同的植物群落对地表径流SS有较强的削减能力,削减率均在55%以上。植物地下部分的根系对土壤有较强的固持能力,植物地上部分增大了土壤表面的粗糙程度,对地表径流起到阻拦作用,降低地表径流的流速,增大了地表径流的截留效率,截留和吸附了径流中的各类悬浮物质,因此对SS削减效果理想(Al-Wadaey et al, 2012)。本研究结果还发现,灌-草(自然恢复)群落地表径流SS削减率比乔-灌-草和灌-草群落分别高出6.15%、18.29%,可能是灌-草(自然恢复)群落中草本植物是经多年优胜劣汰存活下

表 1 不同植物群落构建对地表径流污染物输出的年际(2014—2015)对比分析

Table 1 Comparison analysis of plant community establishment on surface runoff pollutant output during 2014—2015

群落类型 Community type	地表径流养分输出指标年度均值 Mean annual index of surface runoff nutrient output (mg · L ⁻¹)											
	SS		COD		TN		TP		NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N	
	2014年	2015年	2014年	2015年	2014年	2015年	2014年	2015年	2014年	2015年	2014年	2015年
A	273	89	79.31	51.76	8.23	4.89	0.80	0.36	1.72	1.82	3.32	1.18
B	304	136	64.77	50.45	6.38	5.21	0.77	0.34	1.80	1.86	2.84	1.36
C	276	73	67.87	51.25	6.58	4.58	0.74	0.40	1.69	1.88	2.81	1.20

群落类型 Community type	不同植物群落对地表径流养分输出的年度削减率 Reduction rate of the annual output of nutrients on surface runoff in different plant communities (%)											
	SS		COD		TN		NO ₃ ⁻ -N					
A	67.40		34.74		40.58		55.00		-5.81		64.46	
B	55.26		22.11		18.34		55.84		-3.33		52.11	
C	73.55		24.49		30.40		45.95		-11.24		57.30	

注: A. 乔-灌-草; B. 灌-草; C. 灌-草(自然恢复)。

Note: A. Arbor-shrub-herb; B. Shrub-herb; C. Shrub-herb (natural restoration).

表 2 不同植物群落和年度对地表径流污染物输出的方差分析

Table 2 Variance analysis of surface runoff pollutant output in different plant communities and different years

因素 Factor	df	SS		COD		TN		TP		NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
		群落 Community	2	1.91	0.190	1.562	0.249	5.435	0.021	0.026	0.974	0.223	0.803
年度 Year	1	81.19	<0.001	26.12	<0.001	71.855	<0.001	26.860	<0.001	2.488	0.141	83.399	<0.001
群落×年度 Community× Year	2	0.22	0.803	1.145	0.351	6.048	0.015	0.142	0.869	0.262	0.774	1.098	0.365

来的物种,相较于人工构建的草本植物,更适应试验地的生长环境,恢复迅速,从而对 SS 的削减效果明显优于人工构建的植物群落(姚立海,2013)。植物根吸收和微生物代谢作用是 COD 削减的主要方式,且与氧关系密切(王世和,2007)。不同群落植物通过发达的根系为土壤中好氧微生物提供降解有机质的氧气,从而能有效分解有机物(黄沈发等,2008)。本研究中,乔-灌-草群落对 COD 的削减率较灌-草群落和灌-草(自然恢复)群落分别高出 12.63%、10.25%,即灌-草群落对 COD 的削

减效果最差,可能是因为群落植物根系较差,减弱了其对 COD 的吸收作用。试验中三个植物群落对 COD 的削减存在差异,这可能与不同植物吸收能力及提供氧气的能力的不同有关。在本研究中,地表径流 COD 表现出在雨季来临之前含量较高,在雨季之后含量明显降低,这可能是因为雨季来临之前,土壤中污染物质累计量较大,因此,暴雨后地表径流中的污染物质含量最高,COD 的含量也随之较高(陈志良等,2008)。SS 和 COD 的削减效果表明乔-灌-草群落结构的配置有利于更好

的发挥其缓冲、屏障和净化功能。

降雨后的地表径流和泥沙流失是面源污染中 N、P 输出的重要原因。有研究指出,植物群落构建可以通过植物根系吸收,或与重金属螯合物固定及少部分被微生物吸收等方式减少地表径流中 TP 的污染输出(潘忠成,2016)。本研究中,随着群落构建时间的变化,三个不同植物群落对 TP 的削减效果均较为明显,可能是由于 P 难溶于水,常与颗粒泥沙等物质集中在地表,因此三个植物群落发达的根系及微生物均对 TP 的吸收和削减表现出较好的效果。但不同群落对 TP 的削减效果仍存在一定的差异,从群落构建的物种配置来看,乔-灌-草群落和灌-草群落具有更高的生物多样性,同时,不同群落植物在不同的生长时期生长速度不同,对 TP 的吸收存在差异,导致削减效果不同(梁威等,2004)。此外,在本研究中,2014 年地表径流 TP 含量表现为逐步上升的变化趋势,TP 的含量不降反升的原因可能是表层土壤中的 P 通过淋溶和解吸进入地表径流(李怀恩等,2010);2015 年期间,TP 含量变化虽有所降低,但保持着较小的变化趋势,这可能与土壤对 P 的吸附存在积累效应有关,即一旦土壤中 P 达到饱和状态,径流与土壤中 P 的交换作用也趋于平衡,P 的削减率将下降(庾刚等,2009)。钱进等(2009)的研究也表明湖滨带植物群落通过吸附、吸收和沉淀等作用将 TP 储存在湖滨带,并不能像除 N 一样转化为气态,因此随着构建群落的时间变化,出现 TP 饱和状态,导致对 TP 的削减率下降。

潘忠成(2016)研究发现,面源污染中氮素的输出主要以溶解态氮为主,总氮主要由 NO_3^- -N 和有机氮组成,而氨氮的含量较低,且氨氮易被氧化成硝态氮。因此,本研究试验主要分析了 TN 以及溶解态 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 含量的动态变化过程。

徐华山等(2010)研究表明,降雨期间地表径流中 N 的削减主要通过氨化细菌、硝化细菌、反硝化细菌、植物吸收、土壤滞留等作用。其中,对地表径流起主要作用的是硝化和反硝化作用,即 NH_4^+ -N 通过硝化作用转化为 NO_3^- -N,再通过反硝化作用转为氮气释放到大气中(Ma et al, 2007;周金娥和唐立峰,2009)。本研究中,三个不同的植

物群落均对 TN 和 NO_3^- -N 表现出明显的削减效果。植物的根系吸附硝化细菌、反硝化细菌等微生物,并提供了良好的微环境,促进了微生物对 TN 和 NO_3^- -N 的降解和转化,同时,植物在生长期对 N 元素的吸收利用也促进了植物群落对 TN 和 NO_3^- -N 的削减(黄余春等,2012)。在该试验中,乔-灌-草群落的削减效果最好,这可能是因为乔-灌-草群落物种较丰富,不同物种间相互协作,生物量较大,乔木、灌木、草本三者之间形成了庞大的根系网,具有更好的削减效果(李隐等,2012)。但试验并未表现出对 NH_4^+ -N 的削减作用,潘忠成(2016)研究亦发现,植物群落对地表径流 NH_4^+ -N 的削减作用较其它污染物低,其认为可能是由于带正电荷的 NH_4^+ -N 易被带负电荷的土壤吸附,且在形态转化所需反应的时间相对较长所导致。三个不同的植物群落地表径流的 TN 和 NO_3^- -N 在试验期间存在较大的波动性,这可能受三个群落不同植物的生长特性、生物量、植物生长不同的氮源、不同生长时期、种间相互关系等因素影响(徐华山等,2010;黄余春等,2012)。此外,Pinay et al (1993)认为季节性的环境因素变化也是影响植物对污染物削减效应的重要因素。

综上所述,不同植物的生长特性、根系状况、生物量大小、植物群落配置等会导致植物群落对污染物的削减效果表现出一定的差异性,而本研究中,通过人工配置的乔-灌-草、灌-草和灌-草(自然恢复)三个植物群落对滇池流域退耕区地表径流中的 SS、COD、TP、TN 和 NO_3^- -N 均具有较好的削减效果,表明试验构建的三个植物群落对地表径流污染物的削减发挥了重要作用。综合不同年度和不同群落间的整体削减效果来看,在滇池流域退耕区应以乔-灌-草的立体式空间配置方式来构建植物群落,就物种选择而言,草本植物应以恢复当地物种为主,辅以种植部分耐荫且根系发达的物种;灌木和乔木物种应以乡土物种为主;既可综合不同生活型物种削减污染物的优点,充分发挥植物群落的削减效果,又能提高生物多样性和景观多样性,但不同植物群落对污染物的削减机制仍有待进一步研究。

参考文献:

- AI-WADAEY A, WORTMANN CS, FRANTI TG, et al, 2012. Effectiveness of grass filters in reducing phosphorus and sediment runoff [J]. *Water Air Soil Poll*, 223(9): 5865-5875.
- CHEN CY, HE S Z, HU B, et al, 2012. Effects of land use type on spatiotemporal distribution of soil nutrients in Dianchi Watershed, Yunnan Province of Southwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 23(10):2677-2684. [陈春瑜, 和树庄, 胡斌, 等, 2012. 土地利用方式对滇池流域土壤养分时空分布的影响 [J]. *应用生态学报*, 23(10):2677-2684.]
- CHEN S, JIN WT, ZU YQ, et al, 2015. Study on silvopasture systems of agricultural non-point source pollution reduction in Dianchi Lake [J]. *Soil Water Conserv in Chin*, (4):46-49. [陈澍, 荆文涛, 祖艳群, 等, 2015. 林草复合系统削减滇池流域农业面源污染研究 [J]. *中国水土保持*, (4):46-49.]
- CHEN ZL, CHENG J, LIU P, et al, 2008. An experiment on influence of storm on nitrogen loss and phosphorus loss under different land use in River Basin [J]. *J Soil Water Conserv*, 22(5):30-33. [陈志良, 程炯, 刘平, 等, 2008. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响 [J]. *水土保持学报*, 22(5):30-33.]
- CORRELL DL, 2005. Principles of planning and establishment of buffer zones [J]. *Ecol Eng*, 24(5):433-439.
- DENG N, LI HE, SHI DQ, et al, 2011. Nonpoint source pollution of vegetative filter strip and its effect upon purification efficiency [J]. *J Xi'an Univ Technol*, 27(4):400-406. [邓娜, 李怀恩, 史冬庆, 等, 2011. 植被过滤带非点源污染及其对净化效果的影响 [J]. *西安理工大学学报*, 27(4):400-406.]
- FU DG, HE F, GUO Z, et al, 2013. Assessment of ecological restoration function of the coriaria nepalensis-erianthus rufipilus community in the phosphorus-enriched degraded mountain area in the Lake Dianchi Watershed, Southwestern China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 37(4):326-334. [付登高, 何锋, 郭震, 等, 2013. 滇池流域富磷区退化山地马桑-蔗茅植物群落的生态修复效能评价 [J]. *植物生态学报*, 37(4):326-334.]
- GREENWAY M, 2003. Suitability of macrophytes for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia [J]. *Water Sci Technol J Intern Ass Water Poll Res*, 48(2):121-128.
- GUI M, ZHU WP, YU G, et al, 2003. Release regularity of agricultural non-point pollution in drainage area in dianchi region [J]. *J Agro-Environ Sci*, 22(1):1-5. [桂萌, 祝万鹏, 余刚, 等, 2003. 滇池流域大棚种植区面源污染释放规律 [J]. *农业环境科学学报*, 22(1):1-5.]
- GUO HC, SUN YF, 2002. Characteristic analysis and control strategies for the eutrophicated problem of the Lake Dianchi [J]. *Progr Geogr*, 21(5):500-506. [郭怀成, 孙延枫, 2002. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨 [J]. *地理科学进展*, 21(5):500-506.]
- HUANG SF, WU JQ, TANG H, et al, 2008. Study of clarification for riparian-buffer to non-point pollution [J]. *Adv Water Sci*, 19(5):722-728. [黄沈发, 吴建强, 唐浩, 等, 2008. 滨岸缓冲带对面源污染物的净化效果研究 [J]. *水科学进展*, 19(5):722-728.]
- HUANG YC, TIAN K, YUE HT, et al, 2012. Purification effects of common lakeside plant communities in plateau wetlands of Yunnan on the removal of sewage nitrogen [J]. *Ecol Environ Sci*, 21(2):359-363. [黄余春, 田昆, 岳海涛, 等, 2012. 云南高原常见湖滨湿地植物群落对生活污水氮的净化研究 [J]. *生态环境学报*, 21(2):359-363.]
- JIN WH, FU RB, GU GW, 2007. Plant growth characteristics and nutrient uptake from eutrophic water in constructed wetlands [J]. *Res Environ Sci*, 20(3):75-80. [金卫红, 付融冰, 顾国维, 2007. 人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收 [J]. *环境科学研究*, 20(3):75-80.]
- LI HE, DENG N, YANG YQ, et al, 2010. Clarification efficiency of vegetative filter strips to several pollutants in surface runoff [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 26(7):81-86. [李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等, 2010. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果 [J]. *农业工程学报*, 26(7):81-86.]
- LI Y, TIAN K, XIAO DR, et al, 2012. Effects of lakeside plant spatial allocation in plateau wetlands of Yunnan, Southwest China on the removal of sewage nitrogen and phosphorus [J]. *Chin J Ecol*, 31(6):1425-1431. [李隐, 田昆, 肖德荣, 等, 2012. 云南高原湿地湖滨带植物不同空间配置对生活污水 N、P 去除的影响 [J]. *生态学杂志*, 31(6):1425-1431.]
- LI M, 2012. Study on pollutant removal mechanism of stormwater runoff through different plants [D]. Beijing: China University of Geosciences. [李明, 2012. 不同植被配置对降雨径流污染物削减效应的研究 [D]. 北京:中国地质大学.]
- LIANG W, WU ZB, ZHANG FC, et al, 2004. Seasonal variation of macrophytes root-zone microorganisms and purification effect in the constructed wetland system [J]. *J Lake Sci*, 16(4):312-317. [梁威, 吴振斌, 詹发萃, 等, 2004. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化 [J]. *湖泊科学*, 16(4):312-317.]
- LIU SB, 2013. Impact of land use change on inflowing water quality in Dianchi Lake Catchment [J]. *Environ Sci Surv*, 32(2):42-44. [刘松波, 2013. 滇池流域土地利用变化与入湖河流水质关系研究 [J]. *环境科学导刊*, 32(2):42-44.]
- MA Y, CHEN LQ, PENG YZ, et al, 2007. Short-cut/complete nitrification and denitrification in a pilot-scale plant treating actual domestic wastewater [J]. *Environ Sci*, 27(12):2477-2482.

- PAN ZC, 2016. Study on the reduction effect of COD and nitrogen runoff in different types of green space [D]. Beijing: Beijing Forestry University. [潘忠成, 2016. 不同类型绿地对雨水径流中 COD 和氮的削减效应研究 [D]. 北京:北京林业大学.]
- PINAY G, ROQUES L, FABRE A, 1993. Spatial and temporal patterns of denitrification in a riparian forest [J]. *J Appl Ecol*, 30(4):581.
- QIAN J, WANG C, WANG PF, et al, 2009. Research progresses in purification mechanism and fitting width of riparian buffer strip [J]. *Adv Water Sci*, 20(1):139-144. [钱进, 王超, 王沛芳, 等, 2009. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展 [J]. *水科学进展*, 20(1):139-144.]
- RUI YL, 2016. Pilot-scale study on denitrification technology of shallow groundwater in the lakeside of Lake Dianchi [D]. Kunming: Yunnan University. [芮艳兰, 2016. 滇池湖滨带浅层地下水脱氮技术中试研究 [D]. 昆明:云南大学.]
- SHIRLEY SM, 2006. Movement of forest birds across river and clearcut edges of varying riparian buffer strip widths [J]. *For Ecol Manag*, 223(1-3):190-199.
- State Bureau of Environmental Protection, 2002. Water and wastewater monitoring methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environment Science Publishing House: 211-279. [国家环保局, 2002. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社: 211-279.]
- TANG JX, HE MM, WANG DH, et al, 2016. Suspended sediments and runoff reduction by established riparian vegetated filter strips [J]. *Chin J Environ Eng*, 10(5):2747-2755. [汤家喜, 何苗苗, 王道涵, 等, 2016. 河岸缓冲带对地表径流及悬浮颗粒物的阻控效应 [J]. *环境工程学报*, 10(5):2747-2755.]
- TUO G, LI HP, JIN Y, et al, 2009. Characteristics of phosphorus transfer in farmland under artificial rainfall conditions [J]. *J Lake Sci*, 21(1):45-52. [庾刚, 李恒鹏, 金洋, 等, 2009. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征 [J]. *湖泊科学*, 21(1):45-52.]
- WANG SH, 2007. Constructed wetland wastewater treatment theory and technology [M]. Beijing: Sciences Press: 55-59. [王世和, 2007. 人工湿地污水处理理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社: 55-59.]
- WANG Y, HE SZ, HE JQ, 2013. The releasing characteristic of dissolved organic carbon from different soil of different uses at Dianchi Lake Basin [J]. *Environ Poll Contr*, 35(6):73-77. [王娅, 和树庄, 何建强, 2013. 滇池流域不同土壤类型和土地利用方式的土壤中溶解性有机碳的流失特性研究 [J]. *环境污染与防治*, 35(6):73-77.]
- XIONG F, LI WC, PAN JZ, et al, 2005. Efficiency and functioning of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: A review [J]. *Wetl Sci*, 3(3):228-234. [熊飞, 李文朝, 潘继征, 等, 2005. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展 [J]. *湿地科学*, 3(3):228-234.]
- XU HS, ZHAO TQ, HE YX, et al, 2010. Effect of different vegetation types on agricultural non-point nitrogen pollution in riparian wetlands [J]. *Acta Ecol Sin*, 30(21):5759-5768. [徐华山, 赵同谦, 贺玉晓, 等, 2010. 滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果 [J]. *生态学报*, 30(21):5759-5768.]
- YAO LH, 2013. Research on vegetation with different configuration of riparian buffer strips to reduction of pollution load [J]. *J Jilin For Sci Technol*, 42(3):16-20. [姚立海, 2013. 河岸缓冲带植被不同配置对污染负荷削减的研究 [J]. *吉林林业科技*, 42(3):16-20.]
- YAN CZ, JIN XC, ZHAO JZ, et al, 2005. The functions of lakeside zone and its management [J]. *Ecol Environ*, 14(2):294-298. [颜昌宙, 金相灿, 赵景柱, 等, 2005. 湖滨带的功能及其管理 [J]. *生态环境学报*, 14(2):294-298.]
- ZHOU JE, TANG LF, 2009. On purification mechanism and influential factors of constructed wetland system [J]. *Soils*, 41(4):520-524. [周金娥, 唐立峰, 2009. 人工湿地系统的除污机理及影响因素探讨 [J]. *土壤*, 41(4):520-524.]