

碎砖和陶粒配制的拓展型屋顶绿化基材 栽种景天植物对比试验

叶建军^{1,2}, 朱兆华³, 魏道江¹, 肖衡林², 徐国钢³, 梁世庆¹

(1. 湖北文理学院 建筑工程学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 3. 深圳万信达生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518045)

摘要: [目的] 对比建筑垃圾和陶粒配制的拓展型屋顶绿化基材栽种景天植物的效果, 为相关的研究提供参考。[方法] 采用酒糟(5%)、表土(10%)、河沙(25%)、复合肥(4 kg/m³)以及60%陶粒或55%碎砖、5%碎石石灰配制的2种屋顶绿化基材, 现场栽种2种流行的景天植物垂盆草(*Sedum Sarmentosum*)和佛甲草(*Sedum Linare*); 在18个月内考察植物盖度、植物干重、基材养分含量的变化。[结果] 建筑垃圾基材栽种的植物的盖度和干重大于或等于陶粒基材; 建筑垃圾基材的磷、钾养分含量减少与陶粒基材无显著差异, 氮养分含量减少量小于陶粒基材; 佛甲草的盖度和干重显著高于垂盆草。[结论] 建筑垃圾配制的拓展型屋顶绿化基材能取得比陶粒配制的基材更好的绿化效果, 可以取代陶粒用于配制屋顶绿化基材。

关键词: 建筑垃圾; 拓展型屋顶绿化; 基材; 现场试验; 景天植物

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)05-0151-05

中图分类号: S688

文献参数: 叶建军, 朱兆华, 魏道江, 等. 碎砖和陶粒配制的拓展型屋顶绿化基材栽种景天植物对比试验[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 151-155. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.005

Comparative Study on Planting Sedum Plants in Extensive Green Roof Substrates Made of Crushed Brick and Ceramsite

YE Jianjun^{1,2}, ZHU Zhaohua³, WEI Daojiang¹, XIAO Henglin², XU Guogang³, LIANG Shiqing¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053, China;

2. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

3. Shenzhen Wanxinda Ecology and Environment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518045, China)

Abstract: [Objective] The objective of the study is to compare the effects of planting sedum plants in green roof substrates made of crushed brick and ceramsite in order to provide the reference for related research. [Methods] With two types of extensive green roof substrate mixed by using 5% distillers' grains, 10% top soil, 25% sand, compound fertilizer (4 kg/m³) and 60% ceramsite, or 55% crushed brick and 5% lime stone, we planted two popular Sedum species (*Sedum sarmentosum*, SS; *Sedum Linare*, SL) in them, and then investigated coverage and dry weights of plants, and nutrient content (total nitrogen, TN; total phosphorus, TP; and total kalium, TK) in substrate within 18 months. [Results] Plant coverage and dry weights from substrate made of crushed brick were greater or equal to those from substrate made of ceramsite, while the decreases of TP and TK in two substrates did not differ from each other significantly, TN in substrate made of crushed brick reduced less than substrate made of ceramsite. The coverage and dry weights of SS were significantly higher than those of SL. [Conclusion] Green roof plants grow better in the green roof substrate made of crushed brick than substrate made of ceramsite, and thus can replace ceramsite in mixing green roof substrate.

Keywords: construction solid waste; extensive green roof; substrate; field experiment; sedum plants

收稿日期: 2016-05-16

修回日期: 2016-05-16

资助项目: 湖北省教育厅自然科学研究项目“利用建筑垃圾配制屋顶绿化基材试验及应用效果研究”(Q20122502); 湖北工业大学高层次人才科研启动金“陡坡、坡屋面及墙面绿化关键技术研究”(BSQD14047)

第一作者: 叶建军(1974—), 男(汉族), 湖北省英山县人, 博士, 副教授, 从事屋顶绿化和边坡生态防护研究。E-mail: yjjyc@126.com。

通讯作者: 魏道江(1980—), 男(汉族), 湖北省宜昌市人, 博士研究生, 讲师, 主要研究屋顶绿化和施工风险管理。E-mail: wx850120@aliyun.com。

屋顶绿化可分为屋顶花园(或精绿化)和拓展型屋顶绿化(或初绿化、粗绿化)2种形式^[1]。与屋顶花园相比,拓展型屋顶绿化栽种以景天科为主的耐旱、耐贫瘠的多浆植物,具备荷载小、后期基本不用管理、建造成本低等优点,将成为屋顶绿化的主流^[2]。

拓展型屋顶绿化的结构自下而上依次为防水层、泄水层、过滤层和种植层^[1-3]。泄水层通常使用塑料泄水板或孔隙率大的散粒体材料如陶粒、碎石等,主要起排泄多余积水的作用;过滤层一般使用天然或人工合成材料制作的织物,作用是截留种植层中的细颗粒材料,防止土壤流失^[4];种植层是支持植物生长并与气候等因素直接接触的层次。在屋顶绿化各层中,它处于最重要的地位。种植层不仅要满足植物生长需要,还应有利于屋面环保、隔热和存蓄雨水等,不能直接使用普通土壤,需要人工配制的种植基材。种植基材的组成材料一般为无机粗颗粒材料(如沙石或轻质材料如陶粒)、经腐烂除臭的有机质、壤土和肥料组成^[5]。

在进行屋顶绿化建设时,人们通常使用天然沙石或轻质材料如陶粒等建造泄水层和种植层,而对城市中大量产生的建筑垃圾视而不见。实际上从砖、瓦和混凝土的化学成分和物理性质看,它们破碎、筛分后是可以代替天然沙石或人工材料如陶粒等,作为屋顶绿化的建筑材料。Molineux 等^[6]和 Ye 等^[7]就先后用建筑垃圾配制屋顶绿化基材并开展了相关研究,Molineux 等对比研究了用建筑垃圾(碎砖)和 3 种无机固废烧制的陶粒配制的拓展型屋顶绿化基材的最佳有机质含量、矿物和养分含量、淋洗液离子含量等化学性质和堆积密度和颗粒级配等物理性质;Ye 等采用建筑垃圾(碎砖)配制的拓展型屋顶绿化基材栽种佛甲草(*Sedum lineare*)、垂盆草(*Sedum sarmentosum*)和马齿苋(*Portulaca oleracea*),在 2 a 中考察植物和基材中 8 种重金属(Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 和 Hg)的含量的变化规律和植物的最终产量。叶建军等^[8]开展了使用壤土、酒糟、陶粒、水泥配制的屋顶绿化基材栽种垂盆草的试验研究,发现垂盆草有很好的耐碱性且对基材配方适应性良好。

到目前为止,还没有研究对比建筑垃圾和陶粒配制的屋顶绿化基材栽种景天植物的绿化效果。本文拟采用酒糟(5%)、表土(10%)、河沙(25%)、复合肥(4 kg/m³)以及 60%陶粒或 55%碎砖、5%碎石灰石配制的 2 种屋顶绿化基材,现场栽种 2 种流行的景天植物垂盆草(*Sedum Sarmentosum*)和佛甲草(*Sedum Linare*),在 18 个月内考察植物盖度、植物干重、基材养分含量的变化,以期为相关研究提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与基材配方

选用湖北文理学院校外 50 m 路边建筑垃圾中的红砖,破碎后筛分,获得颗粒级配见表 1。采用干净天然沙和隆中路开挖路基渣土石灰石,破碎后筛分获得与碎砖一样的颗粒级配;陶粒采用园林绿化常用烧结膨胀黏土陶粒,经筛分获得与碎砖一样的颗粒级配(表 1);陶粒基本物理参数:堆积密度 460 kg/m³,常压 24 h 吸水率 24%,筒压强度 0.55 MP,软化系数 0.6。选用 N:P₂O₅:K₂O=15:15:15 的复合肥;试验中使用的酒糟来自襄阳三九酿酒厂;表土来自湖北文理学院校外 100 m 耕地表土,为黄棕壤土,养分含量为:全氮 0.46%,全磷 0.52%,全钾 0.59%,pH 值 6.8。

表 1 碎砖、陶粒、天然沙的颗粒级配

粒 径/mm	9.5~4.75	4.75~2.36	2.36~1.18	0.15~1.18
重量比例/%	10	15	40	35

采用上述材料配制 2 种屋顶绿化基材,分别配制配方 1 和配方 2(表 2)。配方 1 参考文献[8];配方 2 用陶粒代替配方 1 中的碎砖和石灰石,其他组分与配方 1 一致。上述 2 配方分别充分拌合后待用。试验采用的植物佛甲草和垂盆草来自襄阳黄集佛甲草种植基地。

表 2 试验用 2 种基材配方

配方体 积比例	60%	25%	10%	5%	每立方 基材 4 kg
配方 1	碎砖 55%, 碎石灰石 5%	河沙	表土	酒糟	复合肥
配方 2	陶粒	河沙	表土	酒糟	复合肥

1.2 现场试验

利用表 2 中配方和景天植物,于 2012 年 11 月 11 日在湖北文理学院 2 号教学楼楼顶开展现场试验。建造面积为 12.40 m×2.20 m 的屋顶绿化试验块。试验块在屋面保护瓷砖上直接建造,试验块自下而上依次为厚度 2 cm 的塑料泄水板(上海绿旺塑料制品有限公司,蓄排水板 26)构成的泄水层;150 g/m²无纺布构成过滤层;种植层厚 4 cm。试验块等分成等面积的 12 小块,其中 6 小块种植层基材用表 2 中配方 1 配制;另外 6 小块使用表 2 中配方 2。配方 1 配制的基材干密度 1.24 g/cm³,饱和含水量 28%、孔隙率 49%;配方 2 配制的基材干密度 0.72 g/cm³,饱和含水量 25%、孔隙率 54%。对于每一种基材配方,3 小块种植佛甲草,另外 3 小块种植垂盆草。栽种

前,筛选植物苗,保证根系和枝条相当,并修剪成长度一致。因此,本试验为2因素(基材和植物)、2水平、4处理3重复的完全随机试验设计,即处理1为佛甲草+基材(配方1);处理2为垂盆草+基材(配方1);处理3为佛甲草+基材(配方2);处理4为垂盆草+基材(配方2)。

1.3 盖度、干重及基材养分测试

为比较4处理的植物生长情况,本研究选择了植物覆盖率(即盖度)和干重2个指标进行比较。分别于2013年4月22日,11月11日和2014年11月10日对12块植物逐一照相,拍照方法是在距离屋面35 cm的高度上从正上方垂直向下拍照,照片处理采用Photoshop软件,圈出每块裸露基材的面积,总面积减去裸露基材面积后,计算出被植被覆盖的面积占整块面积的比例(超出试验块的植物不计算在内)。在2014年11月11日,收割全部12块植物地上部分,用清水清洗后放入烘箱,在70℃下烘12 h后用精度为0.1 g电子天平称重。

试验开始时,测试每块基材养分含量,得到基材养分含量的初始值。2014年11月11日,待地上植物取样完成后,对每块基材取样测试基材养分含量,考虑到大颗粒材料对养分贡献很少,按照土壤试验步骤,待样品晾干后用2 mm孔径方孔筛筛分(大颗粒复合肥压碎,全部通过筛),筛下部分测试养分。测试项目为全磷、全氮和全钾含量。

1.4 数据分析

本文数据分析采用SPSS 17.0。主要数据分析包括:对每一处理、每种植物和基材的不同次测试的盖度进行重复试验方差分析和多重比较;对同次取样的4个不同处理的干重和盖度进行单因素方差分析和多重比较;对植被盖度、干重和基材养分变化进行2×2析因方差分析;对不同处理的基材养分初始含量与最终含量的差异进行配对样本T检验。每次方差分析都进行方差齐次性检验,通过齐次性检验时多重比较采用Post Hoc LSD和方法进行,方差不齐时采用Tamhane进行多重比较。显著水平均为0.05。

2 结果

2.1 盆栽试验植物盖度

3次测量下各处理的盖度如图1所示。图1中线条上每个点的位置为盖度平均值。重复测量方差分析(ANOVAs)显示,各处理3次测量的盖度不同(不服从球形假设,4种方法的F检验, $p<0.001$),2种植物和2种基材的3次测量的盖度也不同(不服从球形假设,4种方法的F检验, $p<0.001$)。对每处理

的重复测量多重比较显示,除了处理1,3的第2次与第3次测量之间无显著差异显著外,其他的都差异显著($p<0.05$),都是最后1次测量(2014年11月10号)的盖度最高,首次测量盖度最低,即植物盖度随时间逐步增大。对每次测量进行单因素(One-Way ANOVA)分析和多重比较,发现第1次测量下,处理1盖度最大,且与处理2,3,4的盖度差异显著($p<0.05$),其他各处理之间的盖度无显著差异($p>0.05$)。第2次测量下,处理1盖度最大(均值89.2%),最小盖度出现在处理4,均值只有54.2%。处理1与处理3之间无显著差异($p>0.05$),但与处理2,4之间有显著差异($p<0.05$);处理2与处理3有显著差异($p<0.05$),与处理4无显著差异($p>0.05$);处理3与处理4之间有显著差异($p<0.05$)。第3次测量下,依然是处理盖度最大(93.7%),处理4最小(71.6%);处理1与处理3无显著差异($p>0.05$),与处理2,4差异显著($p<0.05$);处理2与处理3,4无显著差异($p>0.05$);处理3和处理4差异显著($p<0.05$)。

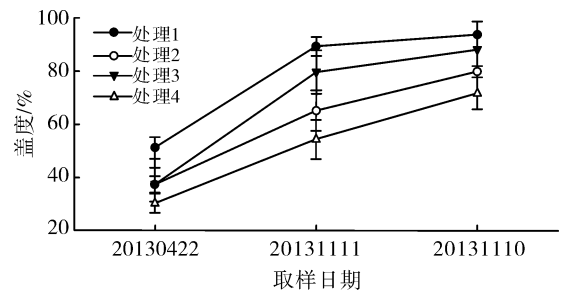


图1 3次测试下各处理的植物盖度

对3次测量的盖度进行2×2析因分析,发现植物种类对盖度影响显著($p<0.05$);前2次测量中基材种类对植物盖度影响显著($p<0.05$),第3次不显著($p>0.05$);3次测量中基材与植物之间都无交互作用($p>0.05$)。同样基材上的佛甲草比垂盆草的盖度高,如测量3中,6块佛甲草(处理1,3)的盖度为 $90.78\pm 5.82\%$,显著高于垂盆草(处理2,4)的盖度 $75.65\pm 8.07\%$ 。碎砖配制的基材比陶粒配制的基材在第1次测量时植物盖度高,即6块配方1(处理1,2)的盖度为 $44.12\pm 3.35\%$,显著高于配方2(处理3,4)的盖度 $33.68\pm 2.45\%$;但在测量2,3中,2种基材的植物盖度没有差异性($p>0.05$)。

2.2 盆栽试验干重

试验结束时,4处理盆栽试验植物地上部分的干重见表3。处理1与处理2,3,4的干重有显著显著($p<0.05$),处理2与处理3,4之间无显著差异($p<$

0.05), 处理 3 与处理 4 差异显著($p < 0.05$)。从比较结果可以发现, 同样的基材下, 佛甲草地上部分的生物量比垂盆草大。对植物地上部分干重进行 2×2 析因分析, 发现植物种类、基材种类都对干重影响显著($p < 0.05$), 基材与植物之间无交互作用($p > 0.05$)。

表 3 现场试验植物地上部分的干重

项目	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
植物	432.5	335.6	328.7	263.1
干重/g	411.3	257.5	356.9	277.7
	397.8	288.3	302.1	254.4
平均值	413.9 ± 17.5^a	293.8 ± 39.3^{bc}	329.2 ± 27.4^b	265.1 ± 11.8^c

注: 不同小写字母表示处理间差异性。下同。

2.3 基材养分含量

4 处理基材在试验结束时的养分含量(即最终值)见图 2。分别对试验结束时基材全氮、全磷、全钾含量进行单因素方差分析和多重比较, 发现除了处理 1($0.41 \pm 0.04\%$)与处理 4($0.27 \pm 0.02\%$)的全氮含量有显著差异外, 其他情况各处理之间均无显著差异性($p > 0.05$)。对全氮含量的最终值进行 2×2 析因分析, 发现植物和基材种类对全氮含量影响显著($p < 0.05$), 基材与植物之间无交互作用($p > 0.05$)。

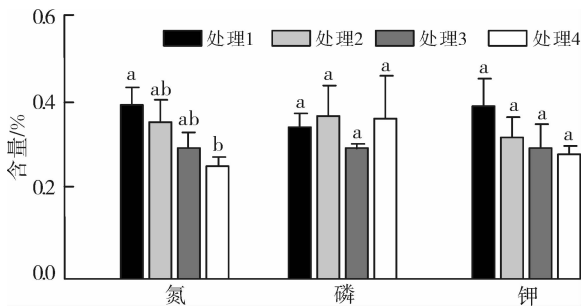


图 2 4 个处理在试验结束时基材养分含量

对每一处理的全氮和全钾的初始值和最终值进行配对检验, 发现除了处理 4 的全氮初始值与最终值之间没有显著性差异外, 其他情况最终值都比初始值显著下降。4 处理全氮平均下降了 0.46% ; 全钾平均下降了 0.54% , 4 处理基材全磷初始含量与最终含量都没有显著差异性(见表 4)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

华中地区夏天炎热, 冬天寒冷。这一地区众多城市在快速城市化进程中, 普遍面临严重环境恶化问题, 如内涝、热岛效应、垃圾围城等。屋顶绿化是改善

和缓解这些城市环境问题的重要手段^[2, 9]。已有研究报道佛甲草和垂盆草可以用于中部地区屋顶绿化工程^[10]。本研究进一步证实这 2 种植物采用栽种的方式, 当年就可以取得较好的绿化覆盖效果, 这比 Ye 等^[7]报道的播种方式要快很多。Ye 等^[7]使用播种方式栽种垂盆草、佛甲草和马齿苋, 2 a 后垂盆草和佛甲草才达到本研究处理 1 栽种 1 a 的盖度。

表 4 基材养分配对检验

项目	(初始值-最终值)/%	方差	T 值	sig. (双尾)
处理 1	TN	0.31	10.77	0.009
	TP	0.18	3.15	0.088
	TK	0.49	8.90	0.012
处理 2	TN	0.47	12.31	0.007
	TP	0.12	2.05	0.177
	TK	0.48	9.34	0.011
处理 3	TN	0.52	15.04	0.004
	TP	0.23	2.53	0.127
	TK	0.63	4.40	0.048
处理 4	TN	0.54	4.13	0.054
	TP	0.26	3.71	0.065
	TK	0.54	6.10	0.026

注: TN 为全氮; TP 为全磷; TK 为全钾。下同。

本研究还发现经过不到 2 a 的时间, 基材的养分除了全磷均值还略高于当地耕地表土外, 全氮和全钾含量均值已经下降到比当地耕地表土含量低; 而且有些处理的植被盖度偏低。产生这个现象的原因可能是: 拓展型屋顶绿化基材厚度小、粗颗粒组分含量大、细颗粒组分含量低造成基材渗透性好, 基材养分(包括复合肥带入的养分)很容易被雨水淋洗带走。这表明将这种基材用于免维护(一般种植后, 无需浇水和除草、只需 2~3 a 施肥 1 次)^[3]的拓展型屋顶绿化工程中, 需要采取一些保肥措施, 如开发新型绿化添加剂或使用控释肥。

有报道表明建筑垃圾可以用于配制屋顶绿化基材^[6-7]。本研究进一步证实在华中气候条件下, 用建筑垃圾配制的基材栽种佛甲草和垂盆草, 绿化效果不比用陶粒配制的轻质基材差, 甚至在初期绿化效果更好。这一现象的原因可能是碎砖颗粒表面裂隙更多, 吸水性更好, 更有利于保水保肥, 也更利于植物生长。

用本文提供的建筑垃圾基材栽种可食用和药用的景天植物(如佛甲草、垂盆草和红景天)并定期收割^[7], 将获得多方面的效益, 如减少碳排放(生产陶粒需要烧制); 就地循环利用建筑垃圾, 实现建筑垃圾的减量化和资源化, 缓解城市垃圾围城的压力; 而建成

的屋顶绿化本身也具有多种生态环境效益^[3]。随着人们对这些生态环保效益的深入认识,有助于克服屋顶绿化相对较高的建造成本带来的推广应用阻力。这对中低收入的国家快速发展屋顶绿化事业有现实意义。因此,可以预测,本文使用的建筑垃圾基材栽种景天植物的技术方案有较好的应用前景。

用建筑垃圾代替陶粒配制屋顶绿化基材,唯一的缺点是重量有所增加。但由于配制拓展型屋顶绿化基材栽种景天植物时,基材厚度很小(本文才4 cm),每1 m²的干重量不到50 kg,即使考虑基材吸水饱和后的重量增加,也不到70 kg。这个重量对多数已有建筑屋顶都可以承受,不必对屋面结构进行加固处理。因此,建筑垃圾配制的拓展型屋顶绿化基材的应用范围将十分广泛。

3.2 结论

(1) 建筑垃圾基材栽种的2种景天植物早期有更好生长效果,后期与陶粒配制的基材无显著差异;表明建筑垃圾能取代陶粒用于配制拓展型屋顶绿化基材。

(2) 栽种植物18个月后,建筑垃圾基材的全磷、全钾养分含量减少与陶粒基材无显著差异;全氮养分含量减少量小于陶粒基材。

(3) 植物盖度随时间逐步增大。试验结束时,同种基材上栽种的佛甲草的盖度和干重显著高于垂盆草。

[参 考 文 献]

[1] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau Troisdorf. Guidelines for the planning, construction and

maintenance of green roofing: Green roofing guideline[M], Germany: FLL, 2008.

- [2] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006,77(3):217-226.
- [3] Dunnett N, Kingsbury N. *Planting Green Roofs and Living Walls* [M]. Portland, USA: Timber Press, 2004.
- [4] 叶建军,余世孝,刘文利,等. 屋顶绿化初绿化基材配方研究[J]. *水土保持通报*, 2010,30(4):157-162.
- [5] 叶建军. 屋顶绿化的植物筛选及生态服务功能研究[D]. 广州:中山大学,2013.
- [6] Molineux C J, Fentiman C H, Gange A C. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the UK[J]. *Ecological Engineering*, 2009,35(10):1507-1513.
- [7] Ye Jianjun, Liu Chuanyin, Zhao Zichao, et al. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive greens roofs[J]. *Ecological Engineering*, 2013,55(2):29-34.
- [8] 叶建军,许文年,余世孝. 屋顶绿化系统及绿化方法:中国, ZL200910063086.1[P]. 2009-12-23.
- [9] Teemusk A, Mander U. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia [J]. *Building and Environment*, 2009,44(3):643-650.
- [10] 周媛,徐冬云,董艳芳,等. 9种轻型屋顶绿化景天属植物的抗旱性研究[J]. *中国农学通报*, 2012,28(25):294-301.

(上接第150页)

- [13] 陈光,贺立源,詹向雯. 耕地养分空间插值技术与合理采样密度的比较研究[J]. *土壤通报*, 2008,39(5):1007-1011.
- [14] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J]. *应用生态学报*, 2000,11(4):557-563.
- [15] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994,58(5):1501-1511.
- [16] 刘好. 甘肃省土壤全氮含量空间分布及与土地利用的关系[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010.
- [17] 杨小林,李义玲,朱波,等. 紫色土小流域不同土地利用

类型的土壤氮素时空分异特征[J]. *环境科学学报*, 2013,33(10):2807-2813.

- [18] 刘合满,曹丽花,曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征[J]. *生态学报*, 2016,36(1):1-7.
- [19] 张振国,黄建成,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工柠条林土壤养分特征及其空间变异[J]. *水土保持通报*, 2007,27(5):114-120.
- [20] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. *资源科学*, 2013,35(12):2434-2443.
- [21] 全国土壤普查办公室. *中国土壤普查技术*[M]. 北京:农业出版社,1990.