

垃圾填埋场覆土层植物根围甲烷氧化活性研究

赵长炜,梁英梅*,张立秋,洪 喻

(北京林业大学 环境科学与工程学院,北京 100083)

摘 要:采用滚管计数法和气相色谱法,研究了植物因素对垃圾填埋场封场覆土层中甲烷氧化菌的数量及其甲烷氧化活性的影响。结果表明:垃圾填埋场不同植物根围土壤中甲烷氧化菌的数量为 $1\times 10^7\sim 1\times 10^8\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$,甲烷氧化速率为 $1\times 10^{-7}\sim 1\times 10^{-8}\text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$;封场时间越短,覆土层中甲烷氧化菌的数量及其甲烷氧化活性越高;甲烷氧化菌数量与甲烷氧化活性之间存在一定的正相关性,但甲烷氧化菌的数量并不是影响甲烷氧化活性的唯一因素。随着植物覆被土壤中的甲烷氧化菌的数量增多,不同种类植物根围的甲烷氧化活性差异明显,比裸露地高38%~45%。建议将小蓬草(*Conyza canadensis*)、稗(*Echinochloa crusgalli*)、佛甲草(*Sedum lineare*)等作为填埋场封场后的甲烷净化功能性先锋物种进行种植。

关键词:垃圾填埋场;甲烷氧化菌;植物;甲烷氧化活性;植被恢复

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2010)06-0059-05

Rhizosphere Methane Oxidation Activity in the Cover Soil of Landfill

ZHAO Chang-wei, LIANG Ying-mei, ZHANG Li-qiu, HONG Yu

(College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Methane that is produced from the landfill can be oxidized by methane-oxidizing bacteria (methanotrophs) in the cover soils. The oxidation activities of these bacteria are affected by several factors, including plant cover. In this study, the effects of plants on the population of methanotrophs in landfill cover soil and methane oxidation activity were investigated using the hungate roll tube method and gas chromatography. The results showed that the population of methanotrophs ranged from 10^7 to $10^8\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ dried soil, and the methane oxidation activity ranged from 10^{-7} to $10^{-8}\text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ in landfill cover soils. The shorter closure time for the landfill, the higher methanotroph population and methane oxidation activity. The methane oxidation activity were positively correlated with the population of methanotrophs, but that was not the only factor to influence the activities. The methanotroph population in landfill cover soil with growing plant increased, but the methane oxidation activity of the rhizosphere soils with different plants covering were different. However, the activity in soils with plant cover was higher than that of bare soils, ranging from 38% to 45%. The functional plants for methane purification, such as *Conyza canadensis*, *Echinochloa crusgalli* and *Sedum lineare*, were suggested as pioneer plant species for revegetation in closed landfills.

Key words: landfill; methanotroph; plant; methane oxidation activity; revegetation

甲烷是主要的温室气体之一,虽然在大气中的浓度较低,但每摩尔甲烷导致气候变暖的效能是二氧化碳的21倍,甲烷对全球温室效应的贡献率高达22%^[1]。垃圾填埋场是甲烷的主要排放源,据估计

垃圾填埋场每年排放的甲烷量为 $2.2\times 10^7\sim 3.6\times 10^7\text{ t}^{[2]}$,占全球每年排放甲烷总量的12%~20%^[3]。我国的垃圾填埋量近年来增长迅速,但大多是裸露堆放或简易填埋,垃圾填埋场释放的甲烷

收稿日期:2010-05-26 修回日期:2010-06-03

基金项目:环保部公益性行业科研专项(200809088)

作者简介:赵长炜,男,硕士研究生。主要研究方向为生态环境污染控制。

* 通讯作者:梁英梅,女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事环境微生物及生态环境污染修复研究。

处于无控制排放状态。填埋场覆土层中的好氧区域存在大量的甲烷氧化菌,甲烷氧化速率达 $290\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,氧化率达 $12\%\sim60\%$ ^[4-5],可有效地减少甲烷的排放。影响覆土层甲烷氧化菌氧化活性的因素主要有温度、含水率、土质和植物因素等,之前的报道主要集中在对温度、含水率和氨氮等因素的研究方面^[6-11],缺乏植物因素对垃圾填埋场覆土层甲烷氧化活性影响的相关研究报道,植物对其根围甲烷氧化菌的作用效果还不十分清楚。

通过对垃圾填埋场覆土层多种植物根围土壤以及无植物区域的土壤中甲烷氧化菌的数量及其甲烷氧化活性测定,分析植物因素对垃圾填埋场封场覆土层甲烷氧化活性的影响,为构建城市生活垃圾填埋场功能性植被组合模式库,以及有效地控制填埋场的甲烷排放提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南某垃圾填埋场始建于 1990 年,共占地约 24.7 hm^2 ,每天消纳城区生活垃圾 500 t。整个场区按照封场时间不同被划分为 A、B、C3 个区。A 区已封场 2 a,植被均为野生草本,优势植物为小蓬草(*Conyza canadensis*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、

稗(*Echinochloa crusgalli*)等,植物种类虽丰富,但植被覆盖率仅为 20%;B 区已封场 7 a,优势植物以小蓬草、狗牙根、棒头草(*Polypogon fugax*)等野生草本为主,夹杂少量人工栽植的大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)等灌木,但人工栽植种类较单一,长势衰弱,植被覆盖率约为 70%;C 区为已封场 10 a 的填埋区,除野生的小苜蓿(*Medicago minima*)、佛甲草(*Sedum lineare*)、野老鹳草(*Geranium carolinianum*)等优势草本植物外,人工种植的黄栌(*Cotinus coggygria*)、金叶女贞(*Ligustrum × vicaryi*)等生长茂盛,植被覆盖率达到 95%以上。该填埋场属于中亚热带湿润季风气候向北亚热带湿润季风气候过渡的地带,年平均气温 $16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1\ 200\sim1\ 900\text{ mm}$,无霜期 272 d,覆土为红壤。

1.2 土壤的采集与测定

试验用土样分别采自 A、B、C 区。根据植被分布特点,分别确定各区中生长旺盛、分布较广的优势野生植物种类,每个区内随机选取同种优势植物的 8 个分散植株,分别采集深度 $15\sim20\text{ cm}$ 的根围土壤,将 8 个植株的根围土壤充分混匀备用。以各区内无植被生长区域的混和土壤作为对照。将土样分别装入纸袋并按采集区域编号,带回实验室过 100 目筛,测定土壤含水率、pH 等主要性质(表 1)。

表 1 取样区概况及土样的基本性质

Table 1 Summary of the sampling areas and basic properties of studied soil samples

填埋区	土样号	植物	含水率/%	pH 值	有机质/%	总氮/%	铵态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
A 区	A1	无植物对照	21.2 ± 1.6	5.3 ± 0.2	1.4 ± 0.3	0.04 ± 0.01	127.2 ± 17.6
	A2	狗牙根	17.1 ± 1.3	5.6 ± 0.1	1.8 ± 0.1	0.04 ± 0.01	143.0 ± 24.5
	A3	小蓬草	19.5 ± 1.8	5.1 ± 0.2	1.6 ± 0.5	0.03 ± 0.01	96.7 ± 19.4
	A4	稗	19.5 ± 1.5	5.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	0.03 ± 0.02	98.2 ± 13.5
B 区	B1	无植物对照	15.8 ± 1.1	4.9 ± 0.5	1.5 ± 0.1	0.04 ± 0.02	118.5 ± 16.8
	B2	狗牙根	16.4 ± 0.7	5.3 ± 0.1	2.1 ± 0.4	0.05 ± 0.00	102.4 ± 12.6
	B3	小蓬草	17.7 ± 1.3	5.0 ± 0.1	1.9 ± 0.2	0.02 ± 0.01	86.1 ± 14.1
	B4	棒头草	16.7 ± 1.6	5.5 ± 0.3	1.9 ± 0.2	0.03 ± 0.01	89.3 ± 9.5
C 区	C1	无植物对照	19.1 ± 1.5	5.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	0.04 ± 0.01	98.6 ± 17.4
	C2	小苜蓿	19.8 ± 1.7	5.5 ± 0.2	1.9 ± 0.2	0.05 ± 0.02	71.4 ± 11.7
	C3	佛甲草	23.6 ± 1.8	5.8 ± 0.3	2.5 ± 0.3	0.04 ± 0.00	90.5 ± 18.3
	C4	野老鹳	22.2 ± 2.1	5.2 ± 0.1	2.6 ± 0.5	0.05 ± 0.01	107.3 ± 26.9

1.3 甲烷氧化菌选择性培养基的制备

甲烷氧化菌选择性培养基^[12]组成($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): NaNO_3 1.0 g, NH_4Cl 0.25 g, KH_2PO_4 0.26 g, $\text{K}_2\text{HPO}_4\cdot3\text{H}_2\text{O}$ 0.74 g, $\text{MgSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 1.0 g, $\text{CaCl}_2\cdot2\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g, $\text{FeSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 0.004 g, ED-TA 0.01 g,微量元素液 10 mL,琼脂 18 g, pH7.2。微量元素液组成($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): $\text{ZnSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 0.34 g, $\text{CuSO}_4\cdot5\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g, MnSO_4 0.3 g, $\text{NaMoO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$ 0.24 g, H_3BO_3 0.1 g。

培养基好氧配制后,分装于厌氧试管中,每支装

4.5 mL,用异丁基橡胶塞密封。

1.4 甲烷氧化菌的培养和计数

甲烷氧化菌数量的测定采用滚管法^[13]。菌落数过低或过高的不作为计数试管,各处理均设 3 个重复。试验用甲烷购于北京氮普北分气体工业有限公司,纯度为 99.9%。

1.5 土壤甲烷氧化活性的测定

分别称取相当于干土重为 20 g 的土样放于 100 mL 血清瓶中,用无菌水将含水率调至 25%,瓶口用异丁基胶塞密封,用无菌注射器各注入 1 mL 甲烷,

30 ℃恒温培养 72 h,所有处理均设 3 次重复,每隔 24 h 采集瓶中的气体 1 mL,用气相色谱法测定各血清瓶中的甲烷的体积分数。甲烷的气相色谱检测采用带有氢火焰离子检测器的气相色谱仪(岛津公司 GC-2014),甲烷测定柱为长 3 m、内径 3 mm 的 GDX-502 不锈钢螺旋填充柱,所用标准气体是用纯氮气稀释过的甲烷标气。检测条件:氮气流量 50 mL·min⁻¹;空气流量 400 mL·min⁻¹;氢气流量 40 mL·min⁻¹;进样器及检测器温度 110 ℃;检测器 FID;柱温 70 ℃。48 h 内甲烷平均氧化速率的计算公式为:

$$V_{48h}=\frac{(\varphi_0-\varphi_{48h})\times 0.1}{22.4\times 20\times 48}$$

(1)

式中: V_{48h} 为 48 h 内甲烷的平均氧化速率(mol·h⁻¹·g⁻¹), φ_0 为初始时刻甲烷的体积分数, φ_{48h} 为培养 48 h 时甲烷的体积分数。

2 结果与分析

2.1 植物根围土壤的甲烷氧化菌数量

表 2 表明,不同采样区域土壤之间甲烷氧化菌数量差异较大,其中 A 区甲烷氧化菌数量高于其他两区,而 B 区和 C 区之间差异不大。在无植物的对照土壤中,其甲烷氧化菌数量为 A>B>C,这可能与各区封场时间不同导致的甲烷产量的差异有关。当垃圾填埋龄为 1.5~2 a 时,填埋垃圾进入产甲烷高峰期,随着垃圾填埋龄期的继续增加,用于产甲烷的底物逐渐消耗殆尽,甲烷产量降低^[14]。A 区封场覆土时间为 2 a,甲烷气体充足,甲烷氧化菌快速增长而达到繁盛;B 区和 C 区覆土已达 7 a 以上,甲烷产量较低,甲烷氧化菌出现衰减。

不同植物根围土壤的甲烷氧化菌数量不同,A 区和 B 区以小蓬草根围土壤中的甲烷氧化菌数量最多,C 区中数量最多的是小苜蓿的根围。植物根围土壤中的甲烷氧化数量均显著高于无植物对照,原因可能是植物根的通气性使得其周围有较高的氧分压^[15]。Stralis 等^[16-17]的研究也发现填埋覆土土壤中甲烷氧化菌群受填埋气体胁迫和植被的影响较大。

2.2 植物根围土壤甲烷氧化活性

不同土壤在甲烷氧化培养期间,血清瓶中甲烷的体积分数逐渐下降,但下降速率存在显著差异(图 1)。A 区各土壤甲烷体积分数的降低速率要明显大于 B 区和 C 区,而对照的甲烷体积分数的降低速率都明显要小于植物根围土壤,且不同种类植物根围土壤间也存在一定差异。

培养 48 h 内甲烷平均氧化速率(图 2)表明,A 区的活性最高,C 区略高于 B 区。前者的原因是由

于 A 区覆土时间较短,甲烷产量大;后者可能是因为 C 区和 B 区的植物种类和覆盖度不同,而且 C 区土壤平均含水率(21.2%)>B 区(16.7%),土壤氧化甲烷的最适含水率为 25%^[18]。3 个填埋区植物根围土壤的平均氧化活性比无植物对照分别提高了 44.5%、38.0% 和 45.0%,说明植物根系活动对土壤中的甲烷氧化活性有显著的促进作用^[19]。

表 2 植物根围土壤甲烷氧化菌数量

Table 2 Population of methanotrophs in rhizosphere soil samples

填埋区	土样号	植物	甲烷氧化菌/ (10 ⁷ cfu·g ⁻¹)
A 区	A1	无植物(对照)	9.97±2.65
	A2	狗牙根	12.43±3.27
	A3	小蓬草	21.58±6.52
	A4	稗	16.36±4.27
B 区	B1	无植物(对照)	6.68±2.81
	B2	狗牙根	8.92±3.59
	B3	小蓬草	10.37±3.28
	B4	棒头草	8.64±2.42
C 区	C1	无植物(对照)	4.45±1.65
	C2	小苜蓿	9.67±2.93
	C3	佛甲草	9.45±3.48
	C4	野老鹳	8.73±3.35

图 1 甲烷体积分数随培养时间的变化
Fig. 1 Time course of CH₄ concentration at the during incubation

2.3 土壤中甲烷氧化菌的数量与甲烷氧化活性的关系

填埋区中,A 区的甲烷氧化菌数量和氧化活性最高,B 区与 C 区的数量和活性都很接近,并且各区内甲烷氧化菌数量多的土壤氧化活性往往也较高。表明土壤中甲烷氧化菌的数量与甲烷氧化活性存在一定的正相关性,但两者在数值上并没有构成明显的正比例关系。可见虽然是甲烷氧化菌氧化了覆土层中的甲烷,但其数量却并不是影响甲烷氧化活性

的唯一因素。陈中云等^[13]研究认为,决定甲烷氧化菌氧化甲烷活性的主要因素并不是甲烷氧化菌的种群数量,而是甲烷氧化菌的氧化甲烷酶系活性。

2.4 覆土层植物对甲烷氧化的促进作用

同一区不同种类植物根围土壤的甲烷氧化活性存在一定差异(图 2),这与不同植物根系的发育情况及通透性的差异有关。例如,填埋场覆土层上生长的小蓬草根系量较大,主根长,侧根很多,与此对应的是在 A 和 B 区中小蓬草根围土壤氧化活性最高。

图 2 覆土层植物根围土壤甲烷氧化活性

Fig. 2 Methane oxidation activity of rhizosphere soil in landfill cover

植物促进甲烷氧化菌氧化活性的原理目前还不十分明确,可能是由于种植植被对垃圾填埋场覆土层中的甲烷氧化菌的群落结构产生了较大影响^[14],如种植苜蓿草和杨树的情况下,Ⅱ型甲烷氧化菌在覆土中具有较高的丰度和氧化活性^[16-17]。植物根系不仅影响土壤的透气性和持水性,同时吸收了大量对甲烷氧化菌有害的铵态氮等,从而对甲烷氧化菌的氧化活性产生间接影响^[20-21]。

3 结 论

植物根系可促进根围覆土中甲烷氧化菌数量的增长,并且使甲烷氧化活性提高 38%~45%。填埋场甲烷产生量以及覆土的含水率、理化性质等对甲烷氧化菌的数量与氧化活性产生一定影响。

垃圾填埋场土壤中甲烷氧化菌的数量范围在 $10^7 \sim 10^8$ cfu · g⁻¹ (干土),甲烷氧化速率 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ mol · h⁻¹ · g⁻¹。土壤中甲烷氧化菌的数量与其甲烷氧化活性存在一定的正相关性,但甲烷氧化菌的数量并不是影响甲烷氧化活性的唯一因素。

垃圾填埋场恶劣的生态条件限制了植物种类的选择,选择的植物是否合理是生态恢复成功与否的关键^[22]。通过对垃圾填埋场野生优势植物的调查

以及根围甲烷氧化菌的研究发现,小蓬草、稗、佛甲草、狗牙根、棒头草、小苜蓿、野老鹳草具有覆盖地表快、适应性强的特点,不仅可以较好地适应填埋场环境的胁迫优先生长,并且对根围甲烷氧化菌的氧化活性具有促进作用。同时,小蓬草生长速度快,小苜蓿、野老鹳草等不仅耐旱,且具有很好的抗酸碱能力;而佛甲草在仅为 30 mm 厚的特殊的基质上就能生长,耐旱抗病^[23]。狗牙根竞争性较强,曾被作为有害杂草,但近年来广泛用于铺建草场、建植运动场、公园、墓地及固土护坡^[24-25]。因此,可以将具有显著促进覆土层中甲烷氧化能力的草本植物如小蓬草、稗、佛甲草等在填埋场封场后优先种植,而对覆土层中甲烷氧化有一定促进作用的小苜蓿、狗牙根、棒头草等在填埋场护坡种植。通过上述植物与其它多种功能性植物合理搭配,利于填埋场生态环境的恢复与再利用。

填埋场覆土层各种野生植物对甲烷氧化菌的影响存在差异。建议将小蓬草、稗、佛甲草等草本植物作为填埋场封场后的先锋物种进行种植,在快速恢复植被生长的同时,尽可能减少填埋场的甲烷排放,实现生态恢复。

参考文献:

- [1] VISSCHER A D, CLEEMPUT O V. Simulation model for gas diffusion and methane oxidation in landfill cover soils[J]. Waste Manage, 2003, 23(7): 581-591.
- [2] BOGNER J E, SPOKAS K A, BURTON E A. Kinetics of methane oxidation in a landfill cover soil: Temporal variations, a whole-landfill oxidation experiment, and modeling of net CH₄ emissions[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31: 2504-2514.
- [3] CRUTZEN P J. Methane's sinks and sources[J]. Nature, 1991, 350: 380-381.
- [4] BARLAZ M A, GREEN R B, CHANTON J P, *et al.* Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38: 4891-4899.
- [5] VISSCHER A D, THOMAS D, BOECKX P, *et al.* Methane oxidation in simulated landfill cover soil environments[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33: 1854-1859.
- [6] BORJESSON G, SUNDH I, SVENSSON B. Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 48(3): 305-312.
- [7] HILGERA H A, CRANFORDA D F, BARLAZ M A. Methane oxidation and microbial exopolymer production in landfill cover soil[J]. Soil Biology Biochemistry, 2000, 32(4): 457-463.
- [8] VISSCHER A D, SCHIPPERS M, CLEEMPUT O V. Short-term kinetic response of enhanced methane oxidation in landfill cover soils to environmental factors[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 33(2): 231-237.
- [9] WANG Z P, INESON P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: Effects of inorganic N[J]. Soil Biology Biochemistry, 2003, 35(3): 427-433.
- [10] REAY D S, RADAJEWSKI S, MURRELL J C, *et al.* Effects of land-use on the activity and diversity of methane oxidizing bacteria in forest soils[J]. Soil Biology Biochemistry, 2001, 33(12): 1613-1623.
- [11] BODELIER P L E, LAANBROEK H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments[J]. Fems Microbiology Ecology, 2004, 47(3): 265-277.
- [12] 梁战备, 史奕, 王琛瑞, 等. 长白山阔叶红松林不同深度森林土壤氧化甲烷研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(1): 71-77.
- LIANG Z B, SHI Y, WANG C R, *et al.* Methane oxidation in soil profiles of broad-leaved/ Korean pine mixed forest in Changbai mountain[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(1): 71-77.
- [13] 陈中云, 闵航, 吴伟祥, 等. 土壤中甲烷氧化菌种群数量及其与甲烷氧化活性的关系[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27(5): 546-550.
- CHEN Z Y, MIN H, WU W X, *et al.* Studies on the population of methane-oxidizing bacteria and methane-oxidizing activity in Huangsong rice-field soil[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Science Edition, 2001, 27(5): 546-550.
- [14] 余婷, 何晶晶, 吕凡, 等. 生活垃圾填埋操作方式对覆土中 I 型甲烷氧化菌的影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2987-2992.
- YU T, HE P J, LV F, *et al.* Effect of operational modes on community structure of type I methanotroph in the cover soil of municipal solid waste landfill[J]. Environmental Science, 2008, 29(10): 2987-2992.
- [15] DUBEY S K, SINGH J S. Spatio-temporal variation and effect of urea fertilization on methanotrophs in a tropical dryland rice field[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 521-526.
- [16] STRALIS-PAVESE N, BODROSSY L, REICHENAUER T G, *et al.* 16S rRNA based T-RFLP analysis of methane oxidizing bacteria: Assessment, critical evaluation of methodology performance and application for landfill site cover soils[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31: 251-266.
- [17] STRALIS-PAVESE N, SESSITSCH A, WEILHARTER A, *et al.* Optimization of diagnostic microarray for application in analyzing landfill methanotroph communities under different plant covers[J]. Environmental Microbiology, 2004, 6: 347-363.
- [18] SCHNELL S, KING G M. Responses of methanotrophic activity in soils and cultures to water stress[J]. Applied and Environment Microbiology, 1996, 62: 3203-3209.
- [19] VANDERNAT F J W A, MIDDELBURG J J. Seasonal variation in methane oxidation by the rhizosphere of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*[J]. Biogeochemistry, 1998, 43: 79-104.
- [20] GILBERT B, ABMUS B, HARTMANN A, *et al.* In situ localization of two methanotrophic strains in the rhizosphere of rice plants[J]. Fems Microbiology Ecology, 1998, 25: 117-128.
- [21] HUTSCH B W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production-invited paper[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 14(4): 237-260.
- [22] 李胜, 张万荣, 茹雷鸣, 等. 天子岭垃圾填埋场生态恢复中的植被重建研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 17-19.
- LI S, ZHANG W R, RU L M, *et al.* Vegetation recovery and ecological restoration of Tianziling municipal solid waste (MSW) landfill[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 17-19.
- [23] 吴剑平, 向艳妮. 佛甲草在南昌地区屋顶绿化中的应用[J]. 江西林业科技, 2008(5): 61-63.
- WU J P, XIANG Y N. Application of *Sedum lineare* on roof greening construction in Nanchang region[J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2008(5): 61-63.
- [24] 王赞, 吴彦奇, 毛凯. 狗牙根研究进展[J]. 草业科学, 2001, 18(5): 37-41.
- WANG Z, WU Y Q, MAO K. Research progress of *Cynodon*[J]. Pratacultural Science, 2001, 18(5): 37-41.
- [25] 吉文丽, 李卫忠. 草坪草引种试验初报[J]. 西北林学院学报, 1999, 14(3): 93-96.
- JI W L, LI W Z. Preliminary studies on introduction of turf-grass[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1999, 14(3): 93-96.