

朱习爱,沈有信,何贝贝,等.喀斯特石冠腐殖土及其对 NH_4^+-N 的吸附性能:以云南石林为例[J].中国岩溶,2015,34(6):616—623.
DOI:10.11932/karst20150611

喀斯特石冠腐殖土及其对 NH_4^+-N 的吸附性能 ——以云南石林为例

朱习爱^{1,2},沈有信¹,何贝贝^{1,2},黄金³

(1.中国科学院西双版纳热带植物园,云南 昆明 650000;2.中国科学院大学,北京 100049;

3.石林风景名胜区管理局,云南 石林 652211)

摘要:石冠腐殖土在喀斯特地区广泛分布,具有维系喀斯特生态系统植物多样性、截留沉降养分和水分等重要的生态功能。本文以云南石林为例,选择典型石漠化生态系统、人工林生态系统和次生林生态系统,实地采集各类小生境的石冠腐殖土样,并进行 NH_4^+-N 吸附实验,探究石冠腐殖土对 NH_4^+-N 的吸附动力学和等温吸附特征。结果表明:石漠化生态系统、人工林生态系统和次生林生态系统每平方米岩石投影面积的石冠腐殖土分别为 $40.45\pm 25.38\text{ g}$ 、 $38.89\pm 9.92\text{ g}$ 和 $397.66\pm 142.71\text{ g}$;石冠腐殖土对 NH_4^+-N 的吸附动力学遵循准二级反应动力学方程,2 min内能完成吸附量的65%~75%,吸附平衡时间约为20 min;腐殖土对氨氮的吸附量随加入 NH_4^+-N 浓度的升高而增加,吸附等温线符合Boxlucas1模型,依据此模型计算出的石漠化生态系统石冠腐殖土的吸附性能最大,最大吸附量约 7.79 g/kg ,人工林次之,为 5.29 g/kg ,次生林的吸附性能最小,吸附量仅为 4.73 g/kg ,腐殖土对氨氮的截留率为20%~50%。

关键词:喀斯特;石冠腐殖土;吸附; NH_4^+-N ;云南石林

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2015)06-0616-08

0 引言

喀斯特分布面积广^[1],但其生态系统脆弱,人类的不合理活动容易导致植被破坏、水土流失,生态功能退化,甚至形成石漠化景观^[2]。类比于林冠腐殖土(Canopy humus)^[3-4],石冠腐殖土(Rock outcrop canopy humus)是残存于喀斯特生态系统裸露岩石表面各种石台、石沟、石隙等高异质、微型小生境内的由截留植被凋落物和部分岩石风化产物形成的腐殖土^[5-6]。石冠腐殖土广泛分布在喀斯特生态系统中,总量相对较小,但具有较高的生物量和养分含量和较好的保水能力,能固着一部分大气干湿沉降和林冠穿透雨及其所含营养成分^[7-9],为岩石生物的生长发育

提供水分、养分,起到维系喀斯特生态系统平衡、促进物质循环、维护附生植物多样性等重要作用。

氮是生态系统中的最重要的营养元素之一,腐殖土对氮的截留影响到其在石面与土面之间的分配,进而影响石面和斑块土壤上生物的生长。石体上小生境类型多样,截留的腐殖土越多,养分越充足,孕育的生物种类就越多,反过来岩石生物的增加也会促进碳酸盐岩风化成土过程^[6]。 NH_4^+-N 是氮素的主要形态,其在土壤中的吸附特性,决定了维持该有效形态的能力^[10],也直接关系到沉降氮对斑块土壤的养分贡献。相对于林冠腐殖土,有关石冠腐殖土的量化研究及石冠腐殖土对氨氮的截留效应还未见报道。本文以云南石林为例^[11],探讨3种不同露石生态系统

基金项目:中国科学院西部之光项目(O7ZK101K02)

第一作者简介:朱习爱(1990—),男,从事碳酸盐岩附着物研究。E-mail: zhuxiai19900624@163.com。

通讯作者:沈有信,男,博士,研究员,主要从事退化生态系统的研究与恢复工作。E-mail: yxshen@xtbg.ac.cn。

收稿日期:2015-08-11

(石漠化生态系统、人工林生态系统和次生林生态系统)内的石冠腐殖土数量及其对大气沉降氮(主要为 NH_4^+-N)的吸附与再分配能力,初步阐明石冠腐殖土在喀斯特生态系统中的地位 and 作用,为喀斯特植被恢复提供参考,为进一步揭示喀斯特石体子系统的生态功能及对大气沉降变化的响应提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于喀斯特集中分布的云南省石林县境内,属亚热带低纬度高原山地季风气候,夏秋半年为雨季(5—10月),冬春半年为旱季(11月至次年4月)。年均温 $14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 850 mm 。历年平均日照数 $2\,318\text{ h}$,日照率 53% ,无霜期 254 d 。植被类型主要为滇中、滇东高原半湿润常绿阔叶林^[12]。本研究选择3类岩石出露比例较高的生态系统作对比:

(1)石漠化生态系统(以下简称为石漠化):多年樵薪后,石体间土壤上偶见低矮植物如岩柿(*Diospyros dumetorum*)、白刺花(*Sophora davidii*)、毛枝绣线菊(*Spiraea martini*)等,上覆植被高度低于样地内大部分石头。样地处斜坡带的峰丛洼地,坡向东西,坡度 30° ,植被覆盖率为 5% 。

(2)人工林植被生态系统(以下简称为人工林):2005年清除原生植被,种植了云南松(*Pinus yunnanensis*)、红叶石楠(*Photinia × fraseri*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)等乔灌木幼树,至今已高于大部分石头。树木间距较大,林窗开阔,林下空旷多杂草。样地坡向东北,坡度 45° ,植被覆盖率为 45% 。

(3)次生半湿润常绿阔叶林生态系统(以下简称为次生林):以清香木(*Pistacia weinmanniifolia*)、云南木犀榄(*Olea yunnanensis*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)为优势种,混有黄连木

(*Pistacia chinensis*)、云南鹅耳枥(*Carpinus monbeigiana*)、毛叶合欢(*Albizia mollis*)等落叶成分,森林保存有相对原始的成分,有一定的群落结构,样地坡向东北,坡度 45° ,石体上着生苔藓和部分高等维管植物,植被覆盖率为 65% 。

2 材料与方法

2.1 样品的采集和处理

2014年10月,于每个样地的坡顶设立一条水平标准线,用塑料绳垂直标准线向下沿坡面拉6条长 100 m 的样带线,样带线横向间隔 10 m ,每条样带线上间隔 10 m 设 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 调查样方,3个样地共计 180 个样方。丈量露石投影面积,计算样方内的露石面积比。参考熊华^[5]等对喀斯特生境的划分标准,将样方内石体上的小生境分为6种:石面、石沟、石隙、石台、石坑和石壁(石体的侧面,坡度约 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$,面积 $0.01 \sim 2\text{ m}^2$),并分别统计其数目。每种小生境类型各选择3个(不足的按实际数目计),用铲子将里面的所有腐殖土刮干净,移入自封袋,3个样品混合后的均值代表一个样方内一种小生境的平均腐殖土质量,编号后带回实验室处理。

样品去除石块等杂质称重后,自然风干,称重,计算含水量、样方的腐殖土总量和单位露石投影面积的腐殖土质量。

将每个生态系统的腐殖土样品混合成一份,过 1 mm 筛,装袋备用。土壤的基本理化性质和吸附试验的 NH_4^+-N 含量检测均由中国科学院西双版纳热带植物园生物地球化学实验室完成。

2.2 供试土样的理化性质

将样品风干后,测定得到3个生态系统石冠腐殖土的理化性质如表1。

表1 供试土样基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test soil

生态系统 类型	pH	含水率 /%	全氮 /mg/kg	全磷 /mg/kg	全钾 /mg/kg	有机质 /%	机械组成/%			
							砂粒	粗粉粒	细粉粒	粘粒
石漠化	7.95	21.99	8.45	0.99	3.22	10.34	12.89	21.54	16.25	49.32
人工林	7.62	30.84	9.02	1.10	4.72	18.52	14.69	28.56	20.46	36.29
次生林	7.37	59.60	23.38	2.13	1.99	31.61	10.84	11.66	26.44	51.06

2.3 氨氮吸附试验

特定浓度下的吸附动力学特征和 25 °C 恒温下的吸附等温线常用来描述土壤的最基本吸附能力^[13-15]。

经烘干的分析纯 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 配制成浓度为 1 000 mg/L 溶液, 稀释为 2、5、20、50、100、200、400 mg/L 的浓度。

(1) 铵的吸附动力学实验。各称取过 1 mm 筛的腐殖土样品 2.5 g 于若干个 250 mL 具塞锥形瓶, 加入 2 mg/L 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 溶液 50 mL, 于 25 °C 下恒温振荡 1、2、3、5、10、15、20、40 min, 取样后经 1 000 r/min 离心 15 min, 取上清液过 0.45 μm 滤膜, 连续流动分析仪测定滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。

(2) 铵的吸附等温实验。分别取过 1 mm 筛的腐殖土样品 1.0 g, 放入若干 250 mL 具塞锥形瓶, 依次加入浓度为 5、20、50、100、200、400 mg/L 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 溶液 50 mL, 于 25 °C 下恒温振荡 2 h, 吸附平衡后取样, 1 000 r/min 离心 15 min, 取上清液过 0.45 μm 滤膜, 测定滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。以上实验均设置空白对照和 3 个重复。

2.4 数据处理和统计分析

对单位面积腐殖土质量、含水率数据进行正态性和方差齐性检验, 发现两者都不满足齐性要求, 通过数据转换后仍达不到要求, 故采用 Kruskal-Wallis 检验和 Wilcoxon 秩检验分析 3 个生态系统间的差异。

吸附是指溶液中溶质在界面层浓度升高的现象^[16]。吸附是一个动态平衡过程, 按下面公式计算被吸附溶质的吸附量。

$$q = \frac{v(c_1 - c + c_0)}{m}$$

式中: q 为吸附量; v 为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 溶液体积; c_1 为 NH_4^+ 初始浓度; c 为吸附平衡时 NH_4^+ 浓度; c_0 为空白对比 (NH_4^+ 初始浓度为 0 mg/L) 吸附平衡时的 NH_4^+ 浓度; m 为加入腐殖土的质量。

2.4.1 吸附动力学模型

常用的吸附模型有准一级动力学吸附模型、准二级动力学吸附模型^[17]。

准一级动力学吸附模型是最常用的动力学模型之一, 由 Lagergren 提出。其表达式为:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

式中, q_e 为吸附平衡时的平衡吸附量; q_t 为时间 t 时的吸附量; t 为吸附时间; k_1 为一级动力学速率常数。利

用上式将 $\ln(q_e - q_t)$ 对 t 作图, 通过直线的斜率和截距可以计算出平衡吸附量 q_e 和速率常数 k_1 。

准二级动力学吸附模型由 Ho 和 McKay 提出, 可以揭示整个吸附过程的行为, 且与速率控制步骤相一致。其表达式为:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

式中, k_2 为二级动力学速率常数。若吸附过程符合准二级动力学方程, 利用上式以 t/q_t 对时间 t 作图, 可得到一条直线, 由斜率和截距可以确定平衡吸附量 q_e 和速率常数 k_2 。

2.4.2 吸附等温线

在一定的温度下, 吸附质的吸附量随平衡浓度变化的关系曲线叫吸附等温线, 其形状和随平衡浓度的变化规律能够反映吸附剂和吸附质之间的吸附作用。本实验中腐殖土样品对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附等温实验结果分别用 Henry、Freundlich、Boxlucas1 模型进行拟合。

Henry 吸附等温公式:

$$q_e = Kc_e$$

Freundlich 吸附等温公式:

$$\ln q_e = \ln k + \frac{1}{n} \ln c_e$$

Boxlucas1 模型:

$$q_e = a(1 - e^{-bc_e})$$

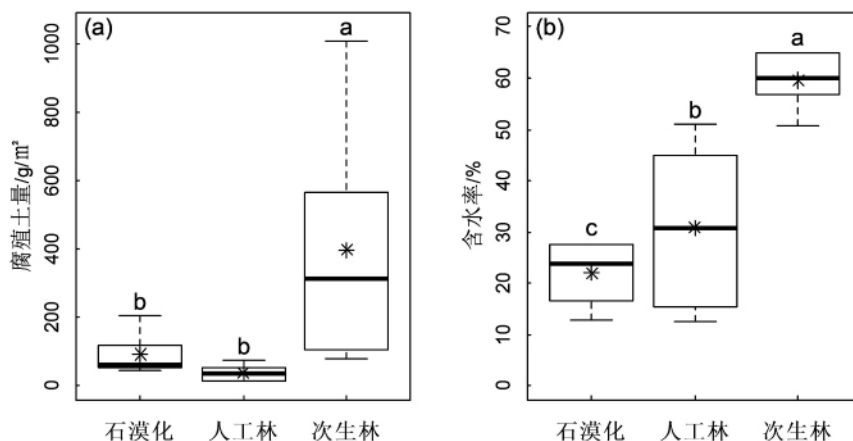
式中, c_e 为吸附平衡时溶质浓度; q_e 为平衡吸附量; K 为亨利系数, 用来表征溶质在吸附剂与溶液中的比值分配; a 、 b 、 k 、 n 是与温度等因素有关的常数。

所有的数据运算与统计作图在 Origin 9.0 和 Excel 中完成。

3 结果与分析

3.1 不同生态系统石冠腐殖土量及含水率差异

人工林生态系统每平方米岩石投影面积的石冠腐殖土 (38.89 ± 9.92 g) 略低于石漠化生态系统 (40.45 ± 25.38 g), 石漠化生态系统显著低于次生林生态系统 (397.66 ± 142.71 g) (图 1(a)), 3 个系统的平均值为 158.99 ± 60.77 g。石漠化生态系统石冠腐殖土的含水率 ($21.99 \pm 2.49\%$) 低于人工林生态系统 ($30.84 \pm 6.28\%$), 人工林生态系统低于次生林生态系统 ($59.60 \pm 2.31\%$), 两两系统间差异均达到显著水平 (图 1(b))。

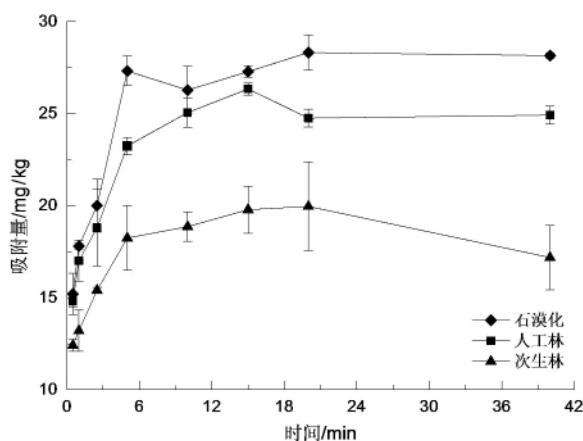
图1 不同生态系统石冠腐殖土量(a)及含水率(b)箱线图(平均值 $\pm$ 标准误)Fig. 1 Boxplot of the weight and moisture content of rock outcrop canopyhumus (mean $\pm$ SE)

注:不同字母表示系统间的差异达到显著($P<0.05$);虚线上下端直线代表1.5倍四分位数间距,超出此范围的圆为异常值点,箱体的顶部和底部代表上下四分位数,中间的粗线代表中位数,于中位数上下浮动的“*”代表平均值。

3.2 石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附特征

3.2.1 吸附动力学特征

3种生态系统石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积吸附量随时间的变化见图2。结果显示,不同生态系统的差别并不显著,曲线特征较为相似。铵氮吸附曲线可分为陡峭、较平缓及平缓3段。初期,吸附量快速增加,曲线迅速上升,吸附速率较快,至5 min后曲线趋于平缓,吸附速率较慢,至20 min后曲线已接近水平,表明吸附达到饱和。故确定3种生态系统的石冠腐殖土在实验条件下的吸附平衡时间几乎相同,均为20 min,且2 min内能完成吸附量的65%~75%,15 min左右吸附量达到90%以上。

图2 不同石冠腐殖土的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积吸附量随时间的变化(平均值 $\pm$ 标准误)Fig. 2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ adsorption amount with time (mean $\pm$ SE)

从图2看出,吸附速率不是零级反应,即不受浓度影响的反应,累积吸附量与时间呈曲线关系。根据图2的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附动力学曲线,采用准一级、准二级反应动力学方程进行拟合,拟合方程的模型参数如表2所示。从结果看出,准一级动力学方程吻合程度较差,准二级反应动力学方程的拟合效果更好,拟合结果为 $R^2>0.99$,均达到极显著水平,即腐殖土的吸附量与时间呈极显著相关关系。在初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为2 mg/L的条件下,从石漠化、人工林到次生林生态系统,石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平衡吸附量(q_e)分别为28.65、25.32、17.67 mg/kg,呈下降趋势,平均为 23.88 ± 3.25 mg/kg。从反应速率上看,次生林生态系统腐殖土的反应速率明显慢一些,人工林稍快,石漠化具有最大的反应速率,即它可以最快地完成吸附过程。

表2 不同生态系统石冠腐殖土吸附准一级、准二级动力学模型参数

Table 2 Parameters and correlation coefficients of pseudo-first, pseudo-second models of humus on rocks among three ecosystems

生态系统类型	一级		二级		$q_{e,exp}$
	k_1	R^2	k_2	R^2	
石漠化	1.189 1	0.728 7	-0.055 6	0.999 5	28.65
人工林	1.420 8	0.674 2	-0.112 2	0.998 9	25.32
次生林	1.715 9	0.603 7	-0.168 6	0.992 9	17.67

3.2.2 吸附等温特征

以平衡吸附量(q_e)为纵坐标,吸附平衡时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 溶液浓度(c_e)为横坐标(图 3(a))发现,石冠腐殖土吸附量随平衡浓度的升高而增加,且不同腐殖土的变化趋势基本相似,在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $<100\text{ mg/L}$ 的范

围内,3 种生态系统的石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附量快速增加;当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $>100\text{ mg/L}$ 时,吸附量增加变缓,趋于稳定。

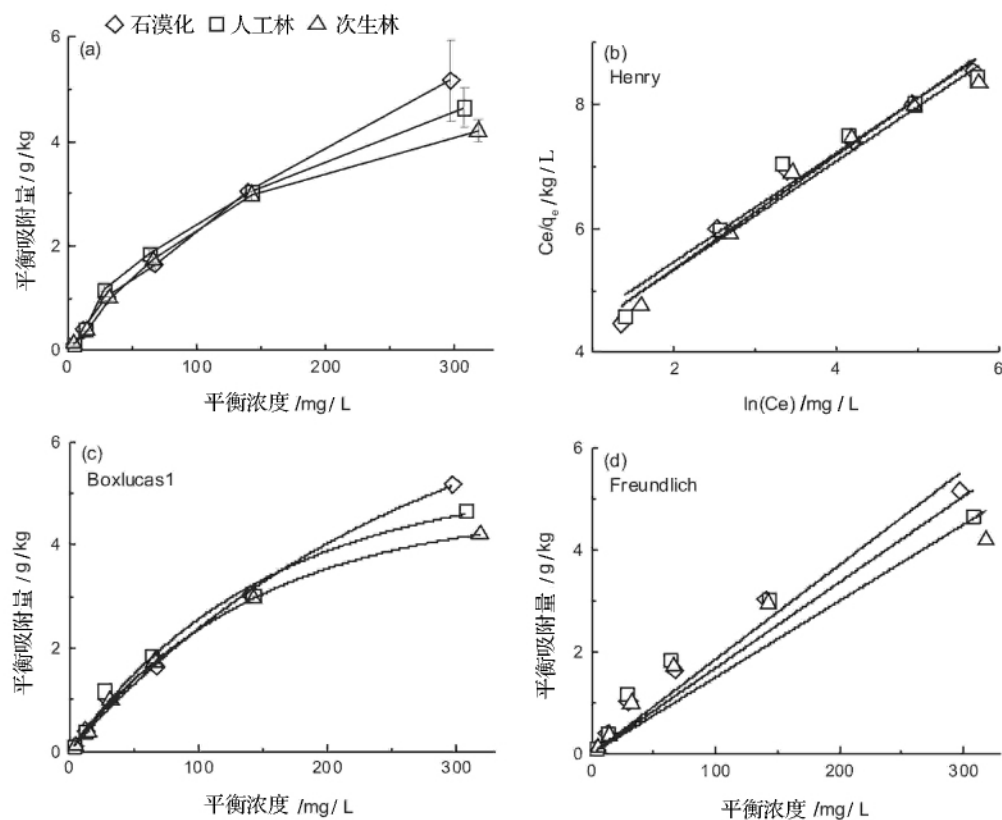


图 3 石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附等温曲线(a)及其 Henry(b)、Boxlucas1(c)、Freundlich(d)模型拟合曲线

Fig. 3 Ammonium adsorption isotherm curve (a) and its Henry (b), Boxlucas1 (c), Freundlich (d) model fitting curve of rock outcrop canopy humus

用 Henry、Boxlucas1、Freundlich 模型模拟 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附等温线(图 3(b—d)),拟合方程的模型参数(见表 2)。结果表明,3 种回归拟合均能较好地表征腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附情况,拟合的相关系数均达到极显著水准,但 Boxlucas1 模型拟合的 R^2 值最大,Henry 和 Freundlich 吸附等温式拟合相关系数相对较低,说明腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附最符合

Boxlucas1 模型。吸附曲线还反映出 3 种生态系统石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附能力不同,通过 Boxlucas1 拟合模式计算出石漠化生态系统石冠腐殖土的最大吸附量约 7.79 g/kg ;人工林次之,为 5.29 g/kg ;次生林的吸附性能最小,最大吸附量仅为 4.73 g/kg 。综合计算,腐殖土对氨氮的截留率为 $20\%\sim50\%$ 。

表 3 不同石冠腐殖土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附等温参数

Table 3 Isotherm coefficients of ammonia adsorption of rock outcrop canopy humus

生态系统 类型	Henry		Boxlucas1			Freundlich		
	K	R ²	a	b	R ²	k	n	R ²
石漠化	18.58	0.98	7.79	0.003 6	0.99	33.51	1.09	0.97
人工林	16.88	0.94	5.29	0.006 6	0.99	40.56	1.14	0.95
次生林	15.03	0.93	4.73	0.006 9	0.99	35.56	1.14	0.96

反过来看,当初始 H_4^+-N 浓度一定时,3种生态系统间未吸附的 NH_4^+-N 量差异不显著(图3(a))。但随着加入的 NH_4^+-N 浓度升高,被吸附的部分越来越少,而未被石冠腐殖土吸附的 NH_4^+-N 量在增加,且增加的幅度越来越大。

4 讨论

4.1 喀斯特石冠腐殖土

喀斯特生态系统中露石和土壤镶嵌共存,若将露石作为一个子系统看待,其上的小生境类型多样,异质性高^[18],露石能截留由雨水、大气干湿沉降所带来的养分、植被枯落物及土壤颗粒等外来物质,再加上石体上形成的生物结皮在一定程度减轻风蚀和水蚀,并通过新陈代谢固定大气中的碳氮元素,增加露石石面有机质和养分蓄积^[6,19-20],这些都正向增加石冠腐殖土的积累。本研究结果显示,石林地区所调查的生态系统内每平方米岩石投影面积的平均石冠腐殖土为 $158.99 \pm 60.77 \text{ g}$,单位面积的腐殖土量并不多,即使以最多的次生林生态系统计,其腐殖土量仅为 $397.66 \pm 142.71 \text{ g/m}^2$,远低于林冠腐殖土的量——哥斯达黎加蒙特沃德森林中林冠腐殖土量高达 2070 g/m^2 ^[21],但它们是石体上植物生长发育的基础,支持了一定数量的岩石生物种类的生存^[22-23]。损毁后的生态系统石冠腐殖土的恢复极为困难,从研究结果看,新建立近10年的人工林系统的单位投影石面面积的腐殖土量相对于石漠化迹地仍没有提高(图1)。随着石漠化程度的增加,系统内上覆植被盖度逐渐减小,太阳辐射增加,出露石体的温度变化越趋剧烈,人工干扰增强,石体所截留的凋落物减少,形成的腐殖土量相应降低,岩石上栖居的生物种类下降。因此,石冠腐殖土的量 and 含水率呈降低趋势(图1)。

4.2 石冠腐殖土的氮吸附

从图2可以看出,3种生态系统石冠腐殖土对 NH_4^+-N 的吸附动力学曲线都可分为快速和慢速阶段,符合准二级反应动力学方程。腐殖土在接触溶液后吸附量很快增大,这是由于加入恒定量的土样,吸附开始时腐殖土可以为低浓度的 NH_4^+-N 提供充足的活性位点用于吸附反应,吸附容量迅速升高;之后曲线有一个下降最后保持平衡的过程,是由于随着吸附反应的进行,土壤胶体吸附位点减少,表面电荷密度小,土壤胶体对 NH_4^+-N 吸附强度较弱,吸附在腐殖土上面的 NH_4^+-N 有部分解吸回溶液中, NH_4^+-N 的吸附量又有所减少。在吸附等温实验中,随着初始

NH_4^+-N 浓度升高,吸附量先增加最后趋于稳定,是因为一定量的腐殖土能吸附低浓度氮氮溶液中大部分 NH_4^+-N ,当 NH_4^+-N 浓度升高后,腐殖土吸附的活性位点相对不足,吸附达到饱和,吸附容量几乎趋于不变。根据 Boxlucas1 拟合模式计算出的石冠腐殖土对 NH_4^+-N 的最大吸附量表现为石漠化生态系统 > 人工林生态系统 > 次生林生态系统(图3(c)),均高于贵州草海湿地农田沟渠沉积物(255.80 mg/kg)及鄱阳湖沼泽湿地土壤(117.65 mg/kg)对 NH_4^+-N 的最大吸附量^[10,24],这可能是因为土壤中的粘粒含量、离子种类以及有机质水平不同等因素造成的。有研究表明,土壤胶体对铵氮的吸附程度随土壤有机质水平和氮氮背景含量的增加而降低,土壤颗粒越细,吸附性就越强,吸附速率也就越大^[24-26]。因为对单位质量的土壤来说,粒度越小,表面积就越大,表面能作用明显,所以吸附效果就比较显著。与非喀斯特地区的土壤相比,石林喀斯特石冠腐殖土的粘粒含量较多,腐殖土对 NH_4^+-N 的吸附性能较强;而在3个生态系统间,石冠腐殖土有机质含量表现为石漠化 < 人工林 < 次生林,虽然石漠化和人工林的粘粒含量低于次生林,但次生林腐殖土的氮氮背景含量可能较高(全氮含量约为石漠化和人工林的2.6倍),大大影响了土样的吸附量和吸附速率。因此,在石冠腐殖土中有机质含量、氮氮背景含量、粒径大小的共同影响下,其对氮氮的平衡吸附量和速率常数总体呈降低趋势。这也体现了自然界的“补偿机制”,养分越匮乏的土壤其对养分的吸附能力越强。

大气干湿沉降在近现代时期十分普遍,其中氮沉降备受关 注^[27]。我国南方雨水中含氮多在 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$ ^[28];2009年滇池流域雨季5—8月总氮沉降量可达 19 kg/hm^2 ,雨水中的总氮浓度约为 2 mg/L ^[29];2012年昆明东郊年氮湿沉降总量为 5.1 kg/hm^2 ,降雨中总氮浓度在 $0 \sim 5.59 \text{ mg/L}$ 之间^[30]。从吸附等温线看,这样的浓度尚达不到最大吸附量所需浓度(图3,表3),因此,在有石冠腐殖土出露的微生境处,很大一部分沉降将被腐殖土吸附,为石面生物的生长提供养分支撑。但是,由于露石上的腐殖土数量有限,吸附量也有限。如果以 Boxlucas1 拟合模式推算出的最大吸附量来计算,土石比为50%时,石漠化生态系统、人工林生态系统和次生林生态系统每公顷里的石冠腐殖土吸附的 NH_4^+-N 仅为 1.58 kg 、 1.03 kg 、 9.40 kg ($10000 \text{ m}^2 \times \text{土石比} \times \text{单位面积腐殖土量} \times \text{Boxlucas1 最大吸附量}$),平均为 4.01 kg ,远低于每公顷的大气氮沉降量。

4.3 喀斯特生态系统中露石的生态功能

如果将喀斯特露石及其周围的土壤斑块看成两个子系统的话,则可发现,二者在物质生产、利用与分配上存在相互关系。高异质性的岩石小生境能蓄积一定量的石冠腐殖土,不仅为岩石生物的殖居提供生长基质,还能与岩石微生物粘结形成生物土壤结皮,固着一定的大气沉降养分,岩石生物还能同化碳氮元素^[31],形成一定的生物量,由于石冠腐殖土的存在,喀斯特生态系统中的“石体子系统”成为具有生产力的亚系统。但是对于来源于大气的各种沉降物,尤其是该实验中的氮,由于石冠腐殖土的数量有限,露石子系统对铵态氮吸附固定能力有限,石冠腐殖土对氮氮的截留率仅为 20%~50%,而未被固着的大气沉降、露石生产的各种养分及岩石表面的附着生物则通过雨水冲刷、风化剥落、食物链传递等方式输送到周围的斑块土壤,给土壤上的植物群落带来有机质和养分^[32],影响其生物群落的发展^[33]。因此,“石体子系统”在一定程度上成为临近“土壤子系统”的潜在养分库,共同孕育出“石林”与“森林”共存的生态系统。

5 结 论

(1)受环境因子、岩溶发育条件、土壤理化性质等因素的共同影响,石林地区所调查的生态系统内每平方米岩石投影面积的平均石冠腐殖土为 158.99 ± 60.77 g,远低于林冠腐殖土的量,且随着石漠化程度的增强,系统内石冠腐殖土的量及含水率逐渐降低。

(2)石冠腐殖土样品对 NH_4^+-N 的吸附动力学均符合准二级反应动力学方程,对其相关系数 R^2 进行相关性检验,均达到差异极显著水平。在初始 NH_4^+-N 浓度为 2 mg/L 的条件下,从石漠化、人工林到次生林生态系统,石冠腐殖土对 NH_4^+-N 的平衡吸附量和速率常数呈下降趋势。

(3)石冠腐殖土的吸附量随吸附平衡时 NH_4^+-N 溶液浓度的升高而增加,等温吸附曲线较符合 Box-lucas1 模型,通过此模型计算出不同石漠化程度生态系统的石冠腐殖土 NH_4^+-N 吸附能力不同,表现为石漠化>人工林>次生林。

(4)露石作为喀斯特生态系统不可或缺的一部分,其上的腐殖土为岩石生物提供养分和水分支撑,使露石的许多重要生态功能被表现出来,因而只有深入研究和揭示石冠腐殖土的养分来源和理化性质,才能更好地认识露石在喀斯特生态系统中的地位和作用。

参考文献

- [1] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1993:1-2.
- [2] 沈有信,江洁,陈胜国,等. 滇东喀斯特山地植被退化及其恢复对策[J]. 山地学报,2005,23(4):425-430.
- [3] Ingram S W, Nadkarni N M. Composition and distribution of epiphytic organic matter in a neotropical cloud forest, Costa Rica [J]. Biotropica, 1993, 25(4): 370-383.
- [4] 刘永杰,刘文耀,陈林,等. 哀牢山两类山地森林林冠及林下腐殖质微生物群落比较[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2257-2266.
- [5] 熊华,于飞. 喀斯特中度石漠化地区不同生境小气候变化特征[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 103-105.
- [6] 连宾. 碳酸盐岩风化成土过程中的微生物作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(1): 52-56.
- [7] 王电杰,沈有信,黄金. 石林 3 种喀斯特生态系统的石面有机质和养分含量[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 16-24.
- [8] Chan Y, Lacap D C, Lau M C Y, et al. Hypolithic microbial communities: between a rock and a hard place [J]. Environmental Microbiology, 2012, 14(9): 2272-2282.
- [9] Matson P A, McDowell W H, Townsend A R, et al. The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments [J]. Biogeochemistry, 1999, 46(1-3): 67-83.
- [10] 弓晓峰,张静,张振辉,等. 鄱阳湖南矶山自然保护区沼泽湿地土壤对 NH_4^+-N 吸附能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 179-181.
- [11] 吴应科. 西南岩溶区岩溶基本特征与资源环境、社会、经济综述 [J]. 中国岩溶, 1998, 17(2): 141-150.
- [12] 张发明,耿弘,李玉辉,等. 中国路南石林喀斯特研究 [M]. 昆明:云南科技出版社, 1997: 4-6.
- [13] 李志安,林永标,沈承德,等. 华南不同人工林土壤铵吸附特征及其吸附动力学研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 383-389.
- [14] 孙大志,李绪谦,潘晓峰. 氮在土壤中的吸附/解吸动力学行为的研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(8): 16-18.
- [15] 熊鹰. 辽河源头区典型农田土壤中 N, P, K 的季节变化规律及吸附特征 [D]. 吉林:吉林大学, 2013: 24-29.
- [16] 杨晓婷,王文科. 砂土对 NH_4^+-N 的吸附研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 6-9.
- [17] 杨华. 硅镁胶的制备表征及其吸附性能研究 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2013: 40-41.
- [18] 廖洪凯,龙健,李娟,等. 喀斯特地区不同植被下小生境土壤矿物组成及有机碳含量空间异质性初步研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 434-439.
- [19] 吴玉环,高谦,程国栋. 生物土壤结皮的生态功能[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 41-45.
- [20] 张红波,于爽,何师意,等. 桂林岩溶区大气降水的化学特征分析[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 289-295.
- [21] Nadkarni N M, Schaefer D, Matelson T J, et al. Comparison of arboreal and terrestrial soil characteristics in a lower montane forest, Monteverde, Costa Rica [J]. Pedobiologia, 2002, 46(1): 24-33.
- [22] 田友萍,张捷,宋林华,等. 云南石林碳酸盐岩表面气生藻类群

- 落的研究[J]. 中国岩溶, 2003, 22(3): 203—211.
- [23] 徐海清, 刘文耀, 沈有信, 等. 云南石林喀斯特地区半湿润常绿阔叶林附生植物的初步研究[J]. 广西植物, 2006, 26(1): 43—48.
- [24] 薛飞, 刘文, 夏品华, 等. 贵州草海湿地农田沟渠沉积物氮磷的吸附动力学及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1999—2005.
- [25] 付海曼, 贾黎明. 土壤对氮、磷吸附/解吸附特性研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 198—203.
- [26] 翟丽华, 刘鸿亮, 徐红灯, 等. 浙江某农场土壤和沟渠沉积物对氨氮的吸附研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1770—1773.
- [27] Amodio M, Catino S, Dambruoso P R, et al. Atmospheric deposition; sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature[J]. Advances in Meteorology, 2014, 2014: 1—27.
- [28] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2002—2012.
- [29] 李欠欠, 汤利. 大气氮沉降的研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(6): 889—902.
- [30] 黄铄淇, 胡慧蓉, 韩钊龙, 等. 昆明东郊大气氮湿沉降的测定与分析[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(4): 418—425.
- [31] Elbert W, Weber B, Burrows S, et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(7): 459—462.
- [32] Kidron G J, Starinsky A. Chemical composition of dew and rain in an extreme desert (Negev); Cobbles serve as sink for nutrients[J]. Journal of Hydrology, 2012, 420: 284—291.
- [33] Goransson H, Edwards P J, Perreijn K, et al. Rocks create nitrogen hotspots and N:P heterogeneity by funnelling rain[J]. Biogeochemistry, 2014, 121(2): 329—338.

Humus on karst rock outcrops and their adsorption of ammonia nitrogen: A case from three ecosystems of Shilin, Yunnan

ZHU Xi-ai^{1,2}, SHEN You-xin¹, HE Bei-bei^{1,2}, HUANG Jin³

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Stone Forest Scenic Area Bureau, Shilin, Yunnan 652211, China)

Abstract A lot of researches had paid attention on canopy humus. Nevertheless, little information is available about the rock outcrop canopy humus in karst ecosystem. Humus offers the growth matrix and nutrients for lithobiontic communities. Humus were collected on the carbonate rocks located in three karst ecosystems with different degree of rocky desertification and quantified; and their adsorption capability on ammonia were investigated in this study by means of simulation experiments. The results showed that the humic substance per square meter are 40.45 ± 25.38 g, 38.89 ± 9.92 g and 397.66 ± 142.71 g in stony desertification, manmade forest and secondary forest ecosystems, respectively. They were significantly different in three ecosystems. When different ammonia solutions were added, humus would absorb 65%~75% within 2 min and adsorption equilibrium time was approximately 20 min. The dynamic adsorption data of NH_4^+-N were well described by pseudo second order reaction rate model. Adsorption isotherm of NH_4^+-N on three kinds of humus could be well fitted by Boxlucas 1. The equilibrium adsorption capacity of humus followed an increasing order from secondary forest ecosystems (4.73 g/kg), to manmade forest ecosystems (5.29 g/kg), and then stony desertification ecosystems (7.79 g/kg). The retention rates of humus for added NH_4^+-N was 20%~50%. It revealed that carbonate rock in southern China function as a nutrient pool, even in oligotrophic stony desertification ecosystem.

Key words karst, rock outcrop canopy humus, adsorption, NH_4^+-N , Shilin

(编辑 吴华英)