

沙漠苔藓植物分解的土壤改良效应

闫德仁, 张胜男, 黄海广, 闫婷

(内蒙古林业科学研究院, 呼和浩特 010010)

摘要:苔藓植物是许多极端环境下植物演替过程中的先锋植物,研究风沙环境下苔藓植物的分解特征及其对风沙土养分变化的影响对科学评价苔藓结皮层生态功能具有重要意义。采用野外分解试验和室内测定相结合的方法,分析了沙漠苔藓植物残体中元素含量变化及其对风沙土养分含量的影响。结果表明:在 0.41~2.33 a 的分解过程中,苔藓植物体全 N、全 P、全 K 和全 C 含量呈现波动降低特征,全 Ca 含量则总体呈现增加趋势;苔藓植物体分解拟合方程为 $Y=115.42e^{-0.1033x}$;苔藓植物残体中 N、P、K 和 C 元素平均积累系数分别为 0.89、0.93、0.87、0.94,而 Ca、Mg 和 Fe 元素的平均积累系数分别为 1.05、1.06、1.02。随着沙漠苔藓植物分解过程时间的增加,0—5 cm 土层全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量均呈现出不同程度的增加趋势。风沙环境以及苔藓植物 N 含量较低,其分解过程缓慢,但仍然存在着 N、P、K 和 C 元素的释放过程,增加风沙土养分含量。

关键词:生物结皮;苔藓植物;分解过程;元素含量;积累系数;土壤养分

中图分类号:S714.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0225-05

Effect of Decomposition of Desert Moss Crust Plant on Soil Improvement

YAN Deren, ZHANG Shengnan, HUANG Haiguang, YAN Ting

(Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Inner Mongolia, Hohhot 010010, China)

Abstract: Bryophytes are pioneers in plant succession in many extreme environments. The study on the decomposition characteristics of desert mossy crust plants and their effects on the changes of nutrients in aeolian sandy soils are important for the scientific evaluation of the ecological functions of moss crusts. The changes of element contents of desert bryophytes and the contents of aeolian sandy soil nutrients were analyzed by the combination of field decomposition test and indoor measurement. The results show that bryophytes decomposition during the period 0.41~2.33 years, the contents of total N, P, K and C of bryophytes present the fluctuating reduction trend, and the content of total Ca increases; the bryophyte decomposition follows the equation, $Y=115.42e^{-0.1033x}$, and the accumulation coefficients of N, P, K and C in bryophyte residues are 0.89, 0.93, 0.87 and 0.94, respectively, the accumulation coefficients of Ca, Mg and Fe elements are 1.05, 1.06 and 1.02, respectively; the contents of total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, available phosphorus and available potassium in 0—5 cm soil layers show different degrees of increasing trend with the extension of the decomposition process of bryophytes. The decomposition process was slow due to the sandy environment and low N content of desert bryophytes. However, there is still releases of N, P, K and C elements, which increases the nutrient contents of aeolian sandy soil.

Keywords: moss biological crust; bryophyte; decomposition process; element content; accumulation coefficient; soil nutrient

苔藓植物作为演替过程中的先锋植物,既是生态系统中重要的生产者,也是许多极端环境的开拓者,其垫状丛生的特性,使其具有强大的吸水和保水功能。尽管苔藓没有根系和角质层,但通过接受降尘和

降雨作为营养物质,其阳离子交换能力强,具有很强的从养分含量极低的环境中吸收并累积养分的能力。叶吉等^[1]认为苔藓植物研究多集中在分类和区系方面,其在生态系统中的作用一直没有引起足够的认

识,常常忽略其在养分循环中的作用。福英等^[2]认为苔藓植物不仅有利于土壤的形成和积累,也有利于土壤 N、P、S、有机质等养分的积累和土壤养分的保持。张元明等^[3]认为干旱环境下苔藓植物参与土壤结皮的形成,并在生物防沙、固沙和生态小环境的改善中发挥着不可替代的作用,其强大的固沙能力和耐旱性对沙漠生态系统的相对稳定性具有重要作用。杜晓晖^[4]研究认为“由藓类植物组成的一层活地被物,实质也是植物群落的组成部分”。而沙漠苔藓结皮作为生物结皮逐渐演化达到顶级类型,能够有效增加土壤养分含量,并进一步为土壤生态系统的健康发展创造了有力条件。诸多研究表明^[5-6],沙漠生物结皮通过养分富集、物质、能量循环作用,促进风沙土演变,尤其是流动沙地生长的维管植物通过沉积足够的黏粒和粉粒,又为生物结皮层发育提供了良好物质条件,形成完整生物结皮层,对流动风沙土发育具有促进作用。而沙漠结皮苔藓植物的分解速度、元素释放如何影响风沙土养分含量等问题研究相对较少。为此,我们采集沙漠结皮中的苔藓植物体并在野外环境下进行分解试验,探讨沙漠结皮中苔藓植物残体的分解过程、元素释放特征及其对表层土壤养分变化的影响,对科学评价苔藓结皮层生态功能具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

沙漠苔藓结皮植物体野外分解试验在库布齐沙漠达拉特旗白土梁林场解放滩作业区。地理坐标 40°21′—40°22′N, 109°50′—109°51′E。气候属温带半干旱季风气候,年平均降雨 317 mm,年平均蒸发量 2 160 mm,极端最高气温 40.2 °C,极端最低气温 -34.5 °C,≥10 °C 年积温 3 197.4 °C,无霜期 130~140 d,8 级以上大风日数 27 d,扬沙日数 58 d,多出现在 3—5 月,年平均风速 3.3 m/s,最大风速 30 m/s。试验地人工固沙林树种为杨树(*Populus*)、沙柳(*S. psammophila*)、沙枣(*E. angustifolia*)等。草本植物有寸苔草(*C. duriuscula*)、披碱草(*E. dahuricus*)、沙米(*A. squarrosus*)、猪毛菜(*S. collina* Pall.)、苦豆子(*S. alopecuroides*)、油蒿(*A. ordosica*)、雾冰藜(*B. dasphylla*)等。植被平均覆盖度 75%。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 在研究地苔藓种类组成主要是芦苔藓(*A. Sphagnum*)、对齿藓(*D. giganteus*)和真藓(*Bryum*)。选择完全由苔藓覆盖、厚度 1.5~2.0 cm 的结皮层,并采集 20 cm×20 cm 方格内全部苔藓结皮层样品,取样时和下层沙土自然分离;然后用筛子筛出土壤,并

放入塑料袋内,在室内用水冲洗剩余土壤,室内风干后的苔藓植物残体(包括假根)样本备用。

野外试验分解袋采用聚乳酸纤维袋,每个分解袋内添加 10 g 风干后的苔藓植物残体。野外试验环境为固定沙地,灌草植被盖度 60%左右,地表无风蚀。然后,将添加 10 g 苔藓植物残体的分解袋平放在试验地内裸露的风沙土上面,定期取回备用。

野外试验分解持续时间 2016 年 4 月—2018 年 8 月,共计 850 d。第 1 次取样时间为野外分解试验开始后第 150 天(0.41 a),第 2 次取样时间为第 300 天(0.82 a),第 3 次为第 670 天(1.83 a),第 4 次为第 850 天(2.33 a),每次取回分解袋数量为 4 个(即 4 个重复)。同时,根据试验地内苔藓植物残体分解袋的定期取样时间,采集每个分解袋覆盖下 0—2 cm, 2—5 cm 土层风沙土样本,每层 4 次重复。没有放置分解袋覆盖的裸露的风沙土样本为对照,研究苔藓植物残体(无生长特征)分解过程对土壤养分含量变化的影响。

定期取回样本在室内测定分解袋内苔藓植物残体失重量以及残体中 N、P、K、C、Ca、Mg 和 Fe 等含量。并根据试验前、试验后样品取出时测定数据变化计算积累系数。

1.2.2 测定方法 土壤全氮、速效氮含量采用 K1100 全自动凯式定氮仪测定,土壤全磷、速效磷含量采用 UV-1800 紫外—可见分光光度计测定,土壤全钾、速效钾含量采用 PinAAcle-900H 原子吸收光谱仪测定。0—2 cm, 2—5 cm 土层养分测定数据的加权平均值为 0—5 cm 土层养分含量的分析数据。

苔藓植物体 N 含量采用 K1100 全自动凯式定氮仪测定,P 含量采用 UV-1800 紫外—可见分光光度计测定,C 含量采用重铬酸钾容量法,K、Ca、Mg、Fe 含量采用 HNO₃-H₂O₂ 消煮,电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima-800IPC-OES)测定。

采用养分积累指数(NAI)表示苔藓植物分解过程中营养元素的积累或释放,计算公式如下。

$$\text{积累系数(NAI)} = (M_t \times X_t / M_o \times X_o) \times 100\%$$

式中: M_t 为 t 时刻的苔藓植物干重(g); X_t 为 t 时刻的苔藓植物元素含量(g/kg); M_o 为苔藓植物的初始干重; X_o 为苔藓植物元素的初始含量(g/kg)。若 $\text{NAI} \leq 100\%$,说明苔藓植物分解过程中某元素发生了净释放;若 $\text{NAI} > 100\%$,说明苔藓植物分解过程中某元素发生了净积累。

2 结果与分析

2.1 苔藓植物体元素含量的变化

苔藓植物没有根系和角质层,但通过接受降尘和降

雨作为营养物质,并具有从养分含量极低的环境中吸收并累积养分的能力。因此,苔藓在物质循环和能量流动方面有着积极作用。从我们测定结果看(表 1),CK 对照处理,沙漠苔藓结皮植物体除 C 元素含量为 180.51 g/kg (即 18.05%)外,其他各元素含量在 1.39~27.59 g/kg。其中,N,P 含量分别为 12.55,1.39 g/kg;K,Ca,Mg,Fe 含量分别为 14.89,27.59,7.28,15.82 g/kg。而吴虹玥等^[7]测定的四川省苔藓植物体中 K,Ca,Mg,Fe 含量分别为

表 1 不同分解时间苔藓植物残体元素含量变化

分解时间/a	全 N	全 P	全 K	全 C	全 Ca	全 Mg	全 Fe
0.41	11.20±0.69	1.33±0.33	12.76±0.31	160.25±1.07	27.64±0.13	6.76±0.78	15.06±0.67
0.82	11.90±0.86	1.29±0.14	12.27±1.27	176.21±0.91	28.52±0.78	7.86±0.12	14.52±0.38
1.83	11.08±0.54	1.21±0.21	12.35±0.99	175.52±1.21	30.19±0.98	8.36±0.47	17.21±0.21
2.33	10.61±0.19	1.36±0.09	14.31±0.85	167.05±1.58	29.49±0.89	7.98±0.35	17.61±0.81
CK	12.55±0.35	1.39±0.05	14.89±1.37	180.51±0.57	27.59±0.76	7.28±0.24	15.82±0.73

同样,在风沙环境下苔藓植物体在不同分解时间段,其全 N、全 P、全 K 和全 C 含量呈现波动变化特征,但总体表现为降低趋势,而全 Ca 含量则总体呈现增加趋势,全 Mg、全 Fe 含量则表现出分解初期减少,分解后期增加的特征。从表 1 可以看出,和对照相比,在 0.41~2.33 a 的分解过程中,N 元素含量平均降低 10.78%,P,K 和 C 元素含量平均分别降低 10.43%,15.94%和 5.96%,Ca 元素含量平均增加 4.96%,而 Mg 元素含量在分解 0.41 a 时其减少 7.14%、在 0.82~2.33 a 期间其平均增加 10.81%,Fe 含量在分解 0.41~0.82 a 期间,其平均减少 6.51%、在 1.83~2.33 a 期间其平均增加 10.05%。表明在风沙环境下苔藓植物体在不同分解时间段不同元素的净释放或净积累特征存在差异。

2.2 苔藓植物体质量损失特征

植物残体在分解过程中,由于淋溶、微生物分解和破碎等作用,造成其质量损失。这种变化程度是植物残体分解过程中最宏观的分解特征,可以用作表征植物残体的分解速率。从图 1 中可以看出,在干旱、高温、少雨风沙环境下,苔藓植物体质量损失非常缓慢,其指数回归拟合方程为 $Y=115.42e^{-0.1033x}$ ($R^2=0.9243$),在野外放置 150 d(0.41 a),只有 5%的质量损失,即使放置 850 d(2.33 a),其质量损失也只有 35%。其原因,除了干旱环境因素外,可能和苔藓植物体较低的 N,P 含量有一定关系。

2.3 苔藓植物残体分解过程中营养元素积累系数变化

苔藓植物作为演替过程中的先锋植物,是许多极端环境的开拓者,其垫状丛生的特性,使其具有强大的吸水 and 保水功能,同时苔藓植物通过体表吸收大量的养分元素。因此,苔藓植物在沙漠土壤生物结

4.55,13.01,2.75,2.57 g/kg,表明沙漠苔藓结皮植物体中 K,Ca,Mg,Fe 含量明显偏高,其原因和风沙环境有密切关系。因为,苔藓植物输导组织不发达,只能从大气沉降中获取营养物质,而风沙环境下苔藓结皮层拦截的沙尘又具有较高的养分含量。如 Fe_2O_3 含量 151.43 g/kg, MgO 含量 32.89 g/kg,CaO 含量 21.28 g/kg, P_2O_5 含量为 4.49 g/kg。所以,风沙环境下沙尘沉降对沙漠苔藓结皮植物吸收化学元素含量具有促进作用。

皮形成、生物防沙、固沙、保持水土、涵养水源以及生态小环境的改善中都发挥着不可替代的作用。尽管在干旱、少雨风沙环境下苔藓植物残体分解极其缓慢,其指数回归拟合方程为 $Y=115.42e^{-0.1033x}$ ($R^2=0.9243$),但其分解过程仍然存在着营养元素的积累或释放特征(图 2)。

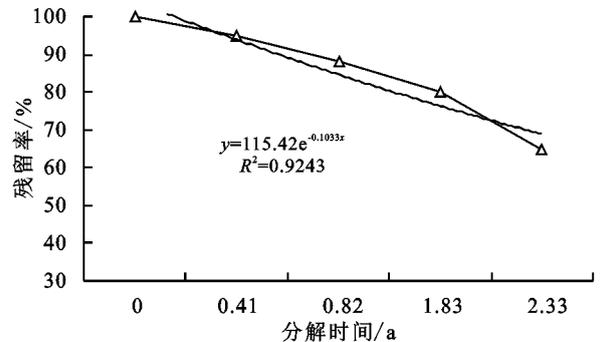


图 1 苔藓植物体质量损失特征

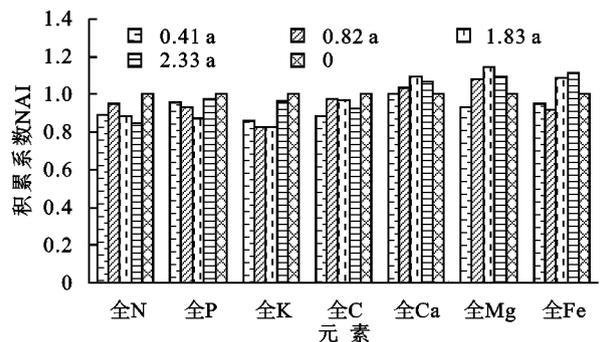


图 2 苔藓植物体分解过程营养元素积累系数变化

从图 2 中可以看出,沙漠苔藓植物残体在 0.41~2.33 a(150~850 d)的分解过程中,N,P,K 和 C 元素的积累系数(NAI)分别为 0.84~0.94,0.87~0.97,0.82~0.96,0.88~0.97,即 $NAI < 100%$,表明 N,P,K 和 C 元素发生了净释放。而 Ca,Mg 和 Fe 元素的积累系数分别为 1.00~1.09,0.92~1.14,0.91~

1.11,说明 Ca 元素发生了净积累,而 Mg 和 Fe 元素在分解前期表现为净释放,分解后期是净积累。值得注意的是苔藓植物残体在分解过程中 Ca 元素发生了净积累,可能和 Ca 元素在残体中存在的形式有关,或者是由于残体中 N,P,K 和 C 元素净释放,相对提高了 Ca 元素的净积累过程。但是不管怎样,N,P,K,C 和 Ca,Mg,Fe 等元素在长达 2.33 a(850 d)的分解时间里,其净释放或净积累量都非常低,进一步表明在干旱、少雨风沙环境下苔藓植物体分解经历着极其缓慢的过程。

此外,从表 2 中可以看出,随着沙漠苔藓结皮植物分解过程时间的增加,苔藓结皮植物体 C/N 值总体呈现出增加趋势,而 C/P 则随着分解过程呈现出“Λ”字型变化特征。也就是说,随着分解进程延长苔藓植物体分解速度更慢。通常认为 C/N 值较高的枯落物分解较慢^[8]。当 C/N 值超过 30 时,N 将成为土壤有机质中的限制因素,微生物分解会因 C/N 比值的增高而变慢^[9]。同样,N/P 是枯落物短期分解的一个重要因素,N/P<10 时,分解受到 N 的限制;N/P>14 时,分解受到枯落物中 P 的限制^[9-10]。所以,干旱、少雨的风沙环境以及苔藓植物较低的 N 含量,促使其分解过程更加缓慢。

2.4 苔藓结皮植物体分解对土壤养分含量变化的影响

沙漠生物结皮层是沙漠地区最具特色的微自然景观,杜晓晖^[4]研究认为“沙漠结皮不仅是沙地固定后环境变化的直观反映,实质也是植物群落的组成部分”,随着沙丘进一步固定,沙漠生态系统不断改善,

表 3 苔藓结皮植物体分解对 0—5 cm 土层土壤养分含量的变化影响

分解时间/a	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷	速效钾
0	0.15±0.01c	0.36±0.02a	14.38±0.66a	7.03±0.35a	3.84±0.95c	67.01±1.80d
0.41	0.22±0.03a	0.38±0.05a	14.44±0.40a	7.59±1.49b	4.23±1.60a	73.68±0.55a
0.82	0.24±0.02a	0.38±0.05a	14.82±1.26a	8.30±0.82c	5.00±0.26b	75.74±3.05a
1.83	0.27±0.04b	0.41±0.03b	14.48±0.96a	8.02±0.31b	5.13±0.96b	92.48±1.28b
2.33	0.25±0.01b	0.43±0.05b	15.07±0.34b	8.38±0.98c	5.23±0.04b	92.43±1.39b

注:不同字母 $p<0.05$ 水平差异显著。

如果从 0—5 cm 土层养分含量变化看(表 3),随着苔藓结皮植物体分解过程增加,土壤全 N,P,K 和速效 N,P,K 养分含量总体呈现出增加的趋势。和对照相比,苔藓结皮植物体分解过程中(0.41~2.33 a),0—5 cm 土层全氮含量平均增加 63.33%、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾含量平均增加 11.11%,2.24%,14.83%,27.54%和 24.73%。这就表明 N,P,K 元素积累系数的差异对 0—5 cm 土层养分含量具有一定影响,或者说积累系数低更有利于土壤养分含量的增加。

促进藓类植物定居,并形成藓结皮,藓结皮盖度不断增加,生物结皮逐渐演化达到顶级,有效增加了土壤养分含量,并进一步为沙漠生态系统的健康发展创造了有力条件。因此,随着苔藓结皮植物体分解过程延长及其营养元素的积累或释放,必将影响表层风沙土养分含量的变化。

表 2 沙漠苔藓结皮植物分解过程 C,N,P 比值变化

分解时间/a	C/N	C/P	N/P
0.41 a	14.31±0.54a	120.49±3.59a	7.07±1.31b
0.82 a	14.81±0.34a	136.60±4.91b	9.37±1.48a
1.83 a	15.84±0.98b	145.06±9.16b	9.34±1.51a
2.33 a	15.75±1.77b	122.83±2.99a	7.58±1.03b
0	14.38±0.19a	129.86±0.25a	9.03±0.15a

注:不同字母 $p<0.05$ 水平差异显著。

从表 3 中看出,随着苔藓结皮植物体分解时间增加,分解袋覆盖下 0—5 cm 土层全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量均呈现出显著增加的趋势,这就进一步印证了前文中的结论,即苔藓结皮植物体分解过程中 N,P,K 元素发生了净释放,且随着淋溶作用,释放的元素淋溶迁移增加了 0—5 cm 土层土壤养分含量。对积累系数和土壤养分变化的相关分析结果表明,苔藓结皮植物 N 积累系数和土壤全氮、速效氮的 Pearson 相关系数分别为 -0.871 和 -0.549; P 积累系数和土壤全磷、速效磷的相关系数分别为 -0.786 和 -0.844; K 积累系数和土壤速效钾的相关系数为 -0.631,说明苔藓植物残体分解过程释放的 N,P,K 元素和增加 0—5 cm 土层养分含量有直接关系($r_{0.05}=0.754$)。

3 讨论

苔藓植物作为生态系统中重要的生产者,是许多极端环境下植物演替过程中的先锋植物,其垫状丛生的特性,使其具有强大的吸水和保水功能,其生态功能逐渐受到研究者的关注。叶吉等^[1]等综述分析了苔藓植物生态功能研究进展,并提出了需要进一步研究的问题,例如,在水分循环方面研究较多,而在养分归还方面的研究较少。而本研究则恰好在野外干旱、少雨风沙环境下尝试进行了沙漠苔藓结皮植物体的

分解过程及其对土壤养分变化影响试验研究,并印证了苔藓植物分解非常缓慢的客观问题,尽管如此,其分解过程仍然存在着营养元素的积累或释放特征,表明苔藓植物在极端环境下仍然具有养分循环作用。

3.1 沙漠生物结皮中苔藓植物研究

苔藓植物作为沙漠生物结皮中的优势物种,通常群集在干旱、贫瘠和强光辐射等维管植物无法生长的地方生长,它们对生物结皮层的逐年增厚、水分维持和养分积累等起着关键性作用,而苔藓植物的定居决定着生物土壤结皮层的发展方向,而形成土壤苔藓植物可以积累周围环境中的水分和浮尘,分泌酸性代谢物,并利用较强的阳离子交换能力从养分含量极低的环境中吸收和积累养分,从而提高土壤肥力^[11-12],有利于改良土壤表层的物理和化学性质,对改善土壤结构及增加土壤表层有机质和氮素含量也具有一定的积极意义^[13-15]。

3.2 苔藓植物元素含量及其循环作用

苔藓植物化学元素积累能力较强,但其化学元素含量因区域空间差异、生态系统间差异等生长环境不同而存在较大差异^[7]。金艳霞等^[16]研究表明青藏高原不同草地类型苔藓植物中 K, Ca, Mg, P 含量分别为 0.65~1.52, 2.59~3.79, 1.68~2.56, 6.32~14.60 g/kg, 每种元素含量变化幅度巨大。我们测定结果表明,沙漠苔藓结皮植物体中 K, Ca, Mg, Fe 含量分别为 14.89, 27.59, 7.28, 15.82 g/kg, 明显比四川省苔藓植物体中 K, Ca, Mg, Fe 含量偏高^[7],也高于青藏高原不同草地类型苔藓植物中 K, Ca, Mg 含量^[16],并且沙漠苔藓结皮植物体分解过程存在着营养元素的释放特征,且能够提高 0—5 cm 土层全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量。此外,对苔藓植物体内元素的研究多数集中在指示大气污染方面,对苔藓植物在生态系统中物质循环方面的研究很少。郝占庆等^[11]研究表明苔藓自开始生长到具有 4~5 层叶片后,每年至少会有 1 层叶片凋落,由于其只具有假根,新生叶片的养分供给大部分来源于所截留的降水,凋落叶片的养分将归还给林地,年归还量相当于苔藓叶片现存量的 1/5~1/4,对于维持整个系统的养分平衡可能具有非常重要的作用。

3.3 维管植物残体分解特征

固沙林枯落物分解是沙地生态系统物质循环和能量流动的重要环节,并对改善风沙土的土壤肥力等方面发挥着重要作用。同时,固沙林枯落物的分解速率决定了养分循环过程的变化,并在在不同植被类型与环境条件下,固沙林枯落物的分解速率及其影响因素存在明显差异。焦树仁^[17]采用野外分解袋法在章古台固沙林中测得的樟子松的年分解率为 19.62%,油松为 20.50%,杨树为 33.08%。陈永亮等^[18]发现胡桃楸、落叶松纯林叶枯落物年分解失重率分别为

61.5%, 24.7%。张鼎华等^[19]研究表明杨树纯林、刺槐纯林和杨树刺槐混交林的最大枯落物分解速率出现在 70% 田间持水量的情况下。而水热差异直接导致相同植物分解速度的差异,王妮等^[20]研究表明东北松嫩草原羊草枯落物的年分解速率几乎为内蒙古典型草原羊草的 3 倍。李学斌等^[21]研究表明,荒漠草原甘草、赖草、蒙古冰草以及黑沙蒿等 4 种枯落物分解 50% 所需时间为 2~5 a, 分解 95% 需 8~24 a, 并且, 4 种植物群落枯落物分解速率与降雨量、枯落物自身含水量的偏相关系数达显著水平。

综上所述,可以看出,枯落物分解一般受到枯落物自身性质、气候、生物等因子的综合影响,并在不同研究区域、不同植物种类、不同土壤条件下,枯落物的初始化学组成与枯落物分解速率的关系存在着差异。而苔藓植物分解速率远远低于维管植物,其影响原因除其自身性质外,干旱应该是主要的影响因素。

4 结论

沙漠苔藓结皮植物体中 K, Ca, Mg, Fe 含量较高,而 N, P 含量偏低,且在 0.41~2.33 a 的分解过程中各元素含量的变化特征不同。在干旱、少雨风沙环境下苔藓植物体分解极其缓慢,但其分解过程仍然存在着 N, P, K 和 C 元素净释过程、Ca 元素净积累,而 Mg, Fe 元素在分解前期为净释放、后期为净积累。

随着苔藓结皮植物体分解过程延长及 N, P, K 元素的释放,不同程度增加了 0—5 cm 土层全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾的含量,且各养分含量增加幅度和积累系数有关,即积累系数低更有利于土壤养分含量的增加。

致谢:本文得到国家自然科学基金“沙漠生物结皮层的成土演变特征及形成机制研究”资助项目;同时对内蒙古瑞普精准检验检测有限责任公司给予分析测定工作的支持表示感谢。

参考文献:

- [1] 叶吉,郝占庆,于德永,等.苔藓植物生态功能的研究进展[J].应用生态学报,2004,15(10):1939-1942.
- [2] 福英,白学良,张乐,等.五大连池火山熔岩地貌苔藓植物对土壤养分积累的作用[J].生态学报,2015,35(10):3288-3297.
- [3] 张元明,曹同,潘柏荣.干旱与半干旱地区苔藓植物生态学综述[J].生态学报,2002,22(7):1074-1079.
- [4] 杜晓晖.沙地地表结皮的研究[J].中国沙漠,1990,10(4):31-36.
- [5] 闫德仁,薛英英,赵春光.国外沙漠生物结皮研究概况[J].内蒙古林业科技,2007,33(1):39-42.
- [6] 闫德仁,薛英英,赵春光.沙漠生物结皮国内研究现状[J].内蒙古林业科技,2007,33(3):28-32.

- 38(3):142-148.
- [29] 刘晓丽,班茂盛,宋吉涛,等.城镇土地集约利用与转变增长方式综合评价研究[J].地理科学进展,2007,26(5):65-76.
- [30] 曲玮,涂勤,牛叔文,等.自然地理环境的贫困效应检验:自然地理条件对农村贫困影响的实证分析[J].中国农村经济,2012(2):21-34.
- [31] 黄晓阳.基于模糊综合评价模型的矿区生态环境分析[C]//中国冶金矿山企业协会,中钢集团马鞍山矿山研究院.2011年中国矿业科技大会论文集,2011.
- [32] 王乃茜.区域农业生态系统协调发展评价研究[D].北京:中央民族大学,2011.
- [33] 蒋维,杨新军,王俊.基于农户尺度的黄土高原农村社会—生态系统体制转换[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):37-41.
- [34] 付凯玲.农户对农业科技投入行为的初步研究[D].南昌:江西农业大学,2016.
- [35] 万金红,王静爱,刘珍,等.从收入多样性的视角看农户的旱灾恢复力:以内蒙古兴和县为例[J].自然灾害学报,2008,17(1):122-126.
- [36] 段伟,任艳梅,冯冀,等.基于生计资本的农户自然资源依赖研究:以湖北省保护区为例[J].农业经济问题,2015,36(8):74-82.
- [37] 张小娟,高敏华,郭兴芬.库尔勒市土地利用效益耦合关系研究[J].安徽农学通报,2012,18(11):25-28.
- [38] 陈宁丽.高标准基本农田建设项目区优选研究[D].河南焦作:河南理工大学,2016.
- [39] 仇娟东,赵景峰,吴建树.基于耦合关系的中国区域土地利用效益水平测度[J].中国人口·资源与环境,2012,22(1):103-110.

~~~~~

(上拉第 224 页)

- [22] 乔蕻强,程文仕.基于熵权物元模型的土地生态安全评价[J].土壤通报,2016,47(2):302-307.
- [23] 毛汉英,余丹林.区域承载力定量研究方法探讨[J].地球科学进展,2001,16(4):549-555.
- [24] 刘庆芳.鄱阳湖生态经济区耕地生态安全演变及评价研究[D].南昌:江西农业大学,2018.
- [25] 宋艳春,余敦.鄱阳湖生态经济区资源环境综合承载力评价[J].应用生态学报,2014,25(10):2975-2984.
- [26] 纪学朋,白永平,杜海波,等.甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性[J].生态学报,2017,37(17):5861-5870.
- [27] 吴大放,刘艳艳,刘毅华,等.耕地生态安全评价研究展望[J].中国生态农业学报,2015,23(3):257-267.

~~~~~

(上接第 229 页)

- [7] 吴虹玥,包维楷,王安.苔藓植物的化学元素含量及其特点[J].生态学杂志,2005,24(1):58-64.
- [8] 郭绪虎,肖德荣,田昆,等.滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解[J].生态学报,2013,33(5):1425-1432.
- [9] 陈婷,郗敏,孔范龙,等.枯落物分解及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(7):1927-1935.
- [10] 秦胜金,刘景双,周旺明,等.三江平原小叶章湿地枯落物初期分解动态[J].应用生态学报,2008,19(6):1217-1222.
- [11] 郝占庆,叶吉,姜萍,等.长白山暗针叶林苔藓植物在养分循环中的作用[J].应用生态学报,2005,16(12):2263-2266.
- [12] 郑云普,赵建成,张丙昌,等.荒漠生物结皮中藻类和苔藓植物研究进展[J].植物学报,2009,44(3):371-378.
- [13] 胡人亮.藓植物学[M].北京:高等教育出版社,1985.
- [14] 吴鹏程.苔藓植物生物学[M].北京:科学出版社,1998.
- [15] 张元明,曹同,潘伯荣.新疆古尔班通古特沙漠南缘土壤结皮中苔藓植物的研究[J].西北植物学报,2002,22(1):18-23.
- [16] 金艳霞,周华坤,赵新全,等.青藏高原不同草地类型苔藓植物化学元素特征[J].草地学报,2013,21(1):65-72.
- [17] 焦树仁.固沙林生态系统的能量流动与物质循环.章古台固沙林生态系统的结构与功能[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1989:75-76.
- [18] 陈永亮,李淑兰.胡桃楸、落叶松纯林及其混交林下叶凋落物分解与养分归还的比较研究[J].林业科技,2004,29(5):9-12.
- [19] 张鼎华,翟明普,林平,等.杨树刺槐混交林枯落物分解速率的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(4):24-27.
- [20] 王妮,郭继勋,张宝田.东北松嫩草地羊草群落环境因素与凋落物分解季节动态[J].草业学报,2003,12(1):47-52.
- [21] 李学斌,陈林,吴秀玲,等.荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J].生态学报,2015,35(12):4105-4114.