

绿洲化对土壤养分及化学计量特征的影响

高君亮, 罗凤敏, 段娜, 陈晓娜, 刘禹廷, 罗红梅, 郝玉光

(内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位研究站/中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要:为了阐明绿洲化过程中土壤养分含量及土壤碳氮磷生态化学计量值的动态变化特征,以乌兰布和沙漠东北部绿洲为研究对象,通过 24 a 的定位监测,分析了土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)及土壤 C、N、P 生态化学计量的动态变化特征。结果表明:(1)研究区土壤总体贫瘠,养分含量整体水平不高。但是随着绿洲建设时间的延长,土壤养分含量呈显著的线性增加趋势。(2)绿洲化过程中,土壤 C:N、C:P、N:P、AN:AP 的变化趋势总体上呈现先增大后减小的趋势,但是达到最大值的时间各不相同。(3)土壤 C、N、P 元素化学计量值与 C、N、P 元素之间的最优拟合关系显示 C:N、C:P 主要受 SOC 影响,N:P 主要受 N 影响,表明 SOC 和 N 含量决定了研究区土壤中 C、N、P 化学计量特征的变化过程。

关键词:土壤养分;化学计量;绿洲化;乌兰布和沙漠绿洲

中图分类号:S158.3;S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0050-06

Soil Nutrient and Stoichiometry Characteristics in Process of Oasisization in the Ulan Buh Desert Oasis, Inner Mongolia

GAO Junliang, LUO Fengmin, DUAN Na, CHEN Xiaona,

LIU Yuting, LUO Hongmei, HAO Yuguang

(Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Research Station/Experimental

Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: Ecological stoichiometry is the study of the balance of multiple chemical elements in ecological interactions, it is the important points and hotspot in ecology research. To illustrate the dynamic changes of soil ecological stoichiometry characteristics and soil carbon, nitrogen, phosphorus in the process of oasisization, a field study was conducted over a period of 24 years in Ulan Buh Desert Oasis, northwestern China. And the contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) were investigated. The results showed as follows. (1) The soil fertility of research area was at the low level. But with the extension of oasis construction time, soil nutrient contents showed the extremely remarkable linear increasing trend. (2) The trend of soil C:N, C:P, N:P and AN:AP showed the increasing trend first and then decreasing trend. Nevertheless, the time to reach the maximum was different in the process of oasisization. (3) The optimal fitting relationship between the soil nutrients and their stoichiometric ratios showed that C:N and C:P were dominated by C, and N:P was dominated by N, indicating that SOC and N contents determine the changing process of C, N and P stoichiometric characteristics in the studied area.

Keywords: soil nutrient; stoichiometry; oasisization; Ulan Buh Desert Oasis

绿洲是指荒漠地区有水源支撑,适于植物生长和人类居住的地方^[1-3],是干旱、半干旱地区特有的地理景观^[4]。绿洲是干旱区的精华,在我国,仅占干旱区总面积 3%~5%的绿洲,却养育了干旱区 90%以上

的人口,创造了 95%以上的农业产值^[2-3]。绿洲化是一个将自然生态系统通过人类活动提升至人工生态系统的过程^[3]。在绿洲化过程中,人类活动改变了以水为主导因素的区域水、土、气、生过程及其相互作用

用^[5]。其中,土壤环境的改变是绿洲化过程中的一个重要方面,绿洲化过程使土壤结构改善,肥力提高,土地熟化等^[2]。揭示绿洲土壤环境特征的变化可为绿洲可持续经营与发展提供理论依据。土壤 C,N,P 元素是生物体体内元素的本质组分与主要来源,在生态系统物质循环及多元素平衡过程中发挥着重要作用^[6-7]。此外,N 和 P 又是陆地植被生长的主要养分限制因子。因此,研究土壤 C,N,P 及其化学计量特征对揭示养分可获得性及 C,N,P 元素的循环和平衡机制具有重要的科学意义^[8]。

河套绿洲是国家重要的商品粮生产基地,也是内蒙古规模最大的绿洲。乌兰布和沙漠绿洲作为河套绿洲的组成部分,是内蒙古自治区生态移民的移入区,为缓解生态困地区人口压力,促进地区经济繁荣和维护社会稳定发挥了重要的作用^[9]。乌兰布和沙漠绿洲以农田为主,防护林镶嵌配套而构成。作为“三北防护林体系建设工程”的重要组成部分,乌兰布和沙漠绿洲为河套地区的经济发展和风沙灾害的减少起着关键作用,长期以来备受众多专家学者的关注。多年以来,众多研究者在该区域已开展了大量的研究工作,主要包括:绿洲农田土壤风蚀监测与评价^[9-11],绿洲防护体系防风固沙效应监测^[12-13],不同土地利用类型的土壤质量评价^[14-15]等。但是,长期定位监测绿洲防护体系土壤养分特征的研究较少^[9],而关于土壤 C,N,P 化学计量特征的研究更是未见报道。基于此,本研究以乌兰布和沙漠东北部绿洲为研究区,从绿洲化视角出发,长期(24 a)定位监测绿洲化过程中土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(AN)和速效磷(AP)的含量,分析其变化特征以及土壤 C,N,P 生态化学计量特征。旨在了解土壤 C,N,P 含量及其化学计量比对绿洲化过程的响应特征,为深入研究绿洲化提供依据,同时也为沙漠绿洲的可持续发展、环境保护和生态恢复等提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北部绿洲区,行政区划隶属于内蒙古磴口县,监测样地位于中国林科院沙漠林业实验中心第二实验场。该区域属温带大陆性气候,年均气温 7.8℃,年均相对湿度 47%,年均降水量 140.3 mm,年均潜在蒸发量 2 380.6 mm。土壤类型主要以风沙土为主。天然植被以白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov.)、油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、沙米(*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.)等荒漠植被为主。人工植被中,乔木以杨柳科

(Salicaceae)植物为主,灌木以梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge.)、花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et C. A. Mey.)等为主。

1.2 土壤样品采集

在绿洲建设初年设置长期监测样地并采集土壤样品,以后每 4 a 采样 1 次。在采样地采用梅花状设置 5 个采样点并做标记,以保证后续监测时原位采样。每个样点采集 0—30 cm 和 30—60 cm 两层土样,最后将 5 个采样点同一层次的土样混合^[7]。

1.3 土壤样品测定

土样阴干后剔除杂物,充分混合均匀;然后按四分法分为 4 份,选择其中 1 份分析土壤养分;样品研磨后使之全部通过孔径 1.0 mm 的土壤筛后分成 2 份,1 份测定 AN 和 AP 含量,另 1 份用孔径 0.25 mm 的土壤筛筛分,选粒径<0.25 mm 的样品测定 SOC,TN 和 TP 含量。具体测定方法参照《土壤农化分析》^[16]。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理和作图;用 SAS 9.0 软件进行数理统计分析(单因素方差分析和回归分析)。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤 C,N,P 含量总体特征

研究区 0—60 cm 的 SOC,TN 和 TP 的平均含量分别为 1.86,0.38,0.74 g/kg;AN,AP 含量分别为 22.81,0.98 mg/kg(表 1)。5 项土壤养分指标均为中等变异(12.47%~16.46%)。其中,AN 和 AP 的变异系数大于 SOC,TN 和 TP,但是差异不显著($p>0.05$)。这是因为土壤速效养分含量及其动态变化与土壤孔隙度数量、微生物种类与数量、水分含量、土壤及空气温度等关系很大,受这些因素的影响,其波动范围或不确定性等会得以加剧^[17-18],进而导致其变异系数大于全效养分。

表 1 土壤养分特征统计

指标	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)
最小值	0.09	0.07	0.30	3.85	0.24
最大值	3.03	0.74	1.24	42.22	1.88
平均值	1.86	0.38	0.74	22.81	0.98
标准差	0.90	0.18	0.32	14.05	0.57
变异系数/%	12.92	12.47	13.44	16.46	15.44

2.2 绿洲化过程中土壤 C,N,P 含量变化特征

从图 1 可以发现,在 24 a 的绿洲化过程中,0—30 cm 的 5 项土壤养分指标含量均较 30—60 cm 的高,但是差异不显著($p>0.05$)。0—30 cm 和 30—

60 cm 的 SOC, TN, TP, AN 和 AP 含量均呈极显著增加趋势 ($R^2 = 0.856 \sim 0.996$, $p < 0.01$), 可用线性函数 $y = ax + b$ 来表述。其中, SOC 和 TN 含量的增加趋势相一致, 前 4 a 内增幅较大, 后 20 a 增幅相对较小, 前 4 a 内 0—30 cm 和 30—60 cm 的 SOC 含量分别增加了 10.5, 11.09 倍, TN 含量分别增加了 4.0, 2.38 倍。TP, AN 和 AP 含量的增加趋势近似, 24 a 内 TP 含量增幅较小, 0—30 cm 和 30—60 cm 的 TP 含量分别增加了 2.44, 2.31 倍, AN 含量分别增加了 9.25, 13.12 倍, AP 含量分别增加了 4.53, 5.52 倍。

2.3 绿洲化过程中土壤 C, N, P 化学计量比变化特征

如图 2 所示, 绿洲化过程中, 土壤 C : N, C : P, N : P, AN : AP 的变化趋势各不相同。C : N 值在 0~4 a 时间段内增幅明显, 以后随时间变化比较平稳, 波动幅度不大, 第 12 年时达到最大值; C : P 和 N : P 值均在 0~4 a 有显著增大的过程, 第 4 a 时达到最大值, 以后显著减小; AN : AP 在 0~16 a 有显著增大的过程, 第 16 年时达到最大值。此外, 从图中还可看出同一化学计量比值, 0—30 cm 和 30—60 cm 的变化趋势是相一致的。

2.4 土壤 C, N, P 之间及其化学计量比的关系

表 2 表明, 研究区浅层 (0—60 cm) 土壤 5 项养分指标含量之间可能存在一定极显著相关关系 ($p < 0.01$)。C : N 与 SOC, TN 之间最优拟合关系为极显著的二次函数关系 ($p < 0.01$); C : P 与 SOC, TP 之间最优拟合关系也为极显著的二次函数关系 ($p < 0.01$); N : P 与 TN, TP 之间最优拟合关系为二次函数关系, 与 TN 达极显著水平 ($p < 0.01$), 而与 TP 为显著水平呈 ($p = 0.02$); AN : AP 与 AN 为显著幂函数关系 ($p = 0.02$), 与 AP 关系不显著 ($p = 0.09$), 此外, 从表中还可以看出, 化学计量比值与分子的相关关系强于与分母的相关关系。

3 讨论

3.1 绿洲化过程中土壤养分含量特征

土壤是陆地植物生长的主要基质, 其 C, N, P 元素是植物生长、发育及物质循环过程中重要的化学元素, 土壤养分的发展是地质大循环和生物小循环共同作用的结果^[19]。本研究发现, 随着绿洲建设时间的延长, 土壤中有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量均有显著的增加。绿洲建设初期, 0—30 cm 和 30—60 cm 的 SOC 含量为 0.14, 0.11 g/kg, 24 a 后增加到了 3.07, 2.96 g/kg。这主要是因为绿洲化过程中, 人工植被的建立、发育以及乡土植物的生长增加了植被盖度和生物量, 枯枝落叶以及凋落物同步增多, 大量枯落物留存于地表, 根系的周转、根系分泌物及根际微生物的积累等增加了土壤中有机碳的输入。

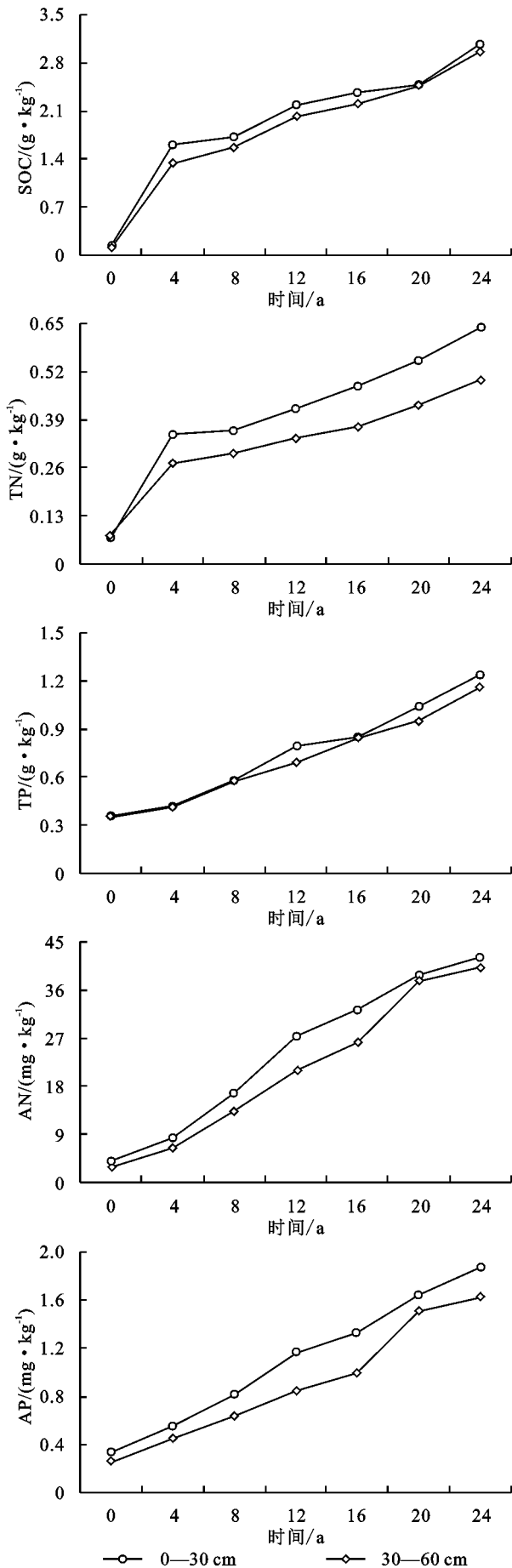


图1 土壤 C, N, P 含量变化特征

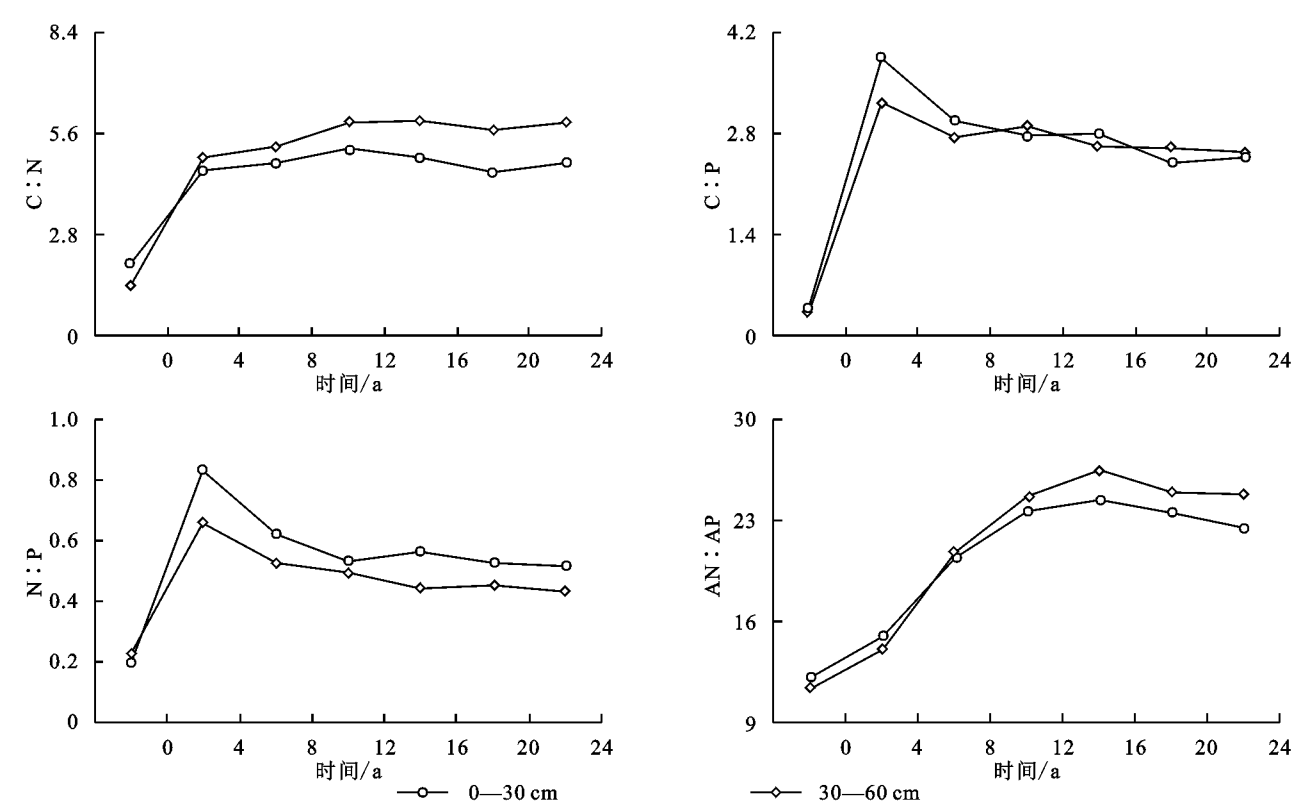


图 2 土壤 C、N、P 化学计量比变化特征

表 2 土壤 C、N、P 含量及其化学计量比相关关系						
养分指标	相关系数及显著水平	SOC	TN	TP	AN	AP
SOC	R^2	1				
	p	0				
TN	R^2	0.93	1			
	p	<0.01	0			
TP	R^2	0.91	0.83	1		
	p	<0.01	<0.01	0		
AN	R^2	0.90	0.82	0.98	1	
	p	<0.01	<0.01	<0.01	0	
AP	R^2	0.89	0.78	0.98	0.99	1
	p	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0
C:N	R^2	0.64	0.51	—	—	—
	p	<0.01	<0.01	—	—	—
C:P	R^2	0.82	—	0.72	—	—
	p	<0.01	—	<0.01	—	—
N:P	R^2	—	0.54	0.38	—	—
	p	—	<0.01	0.02	—	—
AN:AP	R^2	—	—	—	0.47	0.29
	p	—	—	—	0.02	0.09

注：“—”代表两者之间未进行相关分析。

研究表明,随着林分年限增加,地上地下生物量均呈显著增加趋势。如朱玉伟等^[20]发现干旱区杨树成熟林(22 a)的生物量是幼林(5 a)的 12.66 倍,其中,地下生物量由 2.85 kg/株增加到 21.92 kg/株,增长了 8 倍,地上生物量由 22.56 kg/株增加大到

299.83 kg/株,增加了 13.29 倍。赵英铭等^[21]在磴口沙漠绿洲的研究中发现,胸径 10 cm 的新疆杨树林根系生物量为 6.79 t/hm²,而胸径 40 cm 的新疆杨树林的根系生物量为 169.83 t/hm²,增加了 25 倍;第二,植被的存在使地表粗糙度增加,降低了风速,减轻了土壤风蚀,使得地表细粒物质留存,不断地改善了土壤表面的物理性质,为土壤养分的积累提供必要条件。此外,植被拦截风沙流和部分大气降尘,使得更多细粒物质沉降在地面,进而增加了 SOC 含量。研究结果与余海龙^[19],栗忠飞^[22],邱新彩^[23]等的研究结果类似,即随着植被恢复年限的增加,SOC 呈显著增加趋势。N 是土壤养分最重要的指标,是植物吸收的大量元素之一。研究区 0—30 cm 和 30—60 cm 的 TN 含量分别由 0.07、0.08 g/kg 增加到了 0.64、0.50 g/kg, AN 含量分别由 4.12、2.85 mg/kg 增加到了 42.22、40.24 mg/kg,研究表明,土壤 N 的 95%来源于土壤有机质^[24],绿洲化过程中,人工植被增多,沙化治理程度提高,天然植被也逐渐增多,枯落物数量增加,进而使土壤 N 含量增加。这与廖空太等^[24]的研究结果相一致,防风固沙林定植 20 a 后,TN 含量增加 48.3%。P 是一种沉积性矿物,不利于迁移,土壤 TP 含量主要受土壤母质、气候、植被的影响^[25-27],但是,有机质的积累和矿化直接影响 TP 含量的变化,土壤 TP 的 40%~60%来源于土壤有机质^[25]。绿洲化过程中,尽管 TP 的增加速率相对较慢,但是也从绿洲建设之初的 0.36、0.35 g/kg 增加到了 1.24、1.16 g/kg。AP 含量也由 0.34、

0.25 mg/kg 增加到了 1.88, 1.63 mg/kg。有研究结果显示绿洲防护林建设 20 a 后, TP 含量增加 76.3%^[24], 这与本研究结果相似。

3.2 绿洲化过程中土壤养分生态化学计量特征

土壤 C:N:P 生态化学计量特征可以反映出土壤有机质组成和质量程度, 是表征土壤内部 C, N, P 化学元素循环的一个重要指标^[26]。

土壤 C:N 是衡量土壤 C, N 营养平衡状况的指标, 是土壤质量评价的敏感指标。土壤 C:N 会影响 C 和 N 的循环, 较低的 C:N 表明土壤有机质具有更快的矿化速率^[27]。本研究结果显示, 绿洲化过程中, 土壤 C:N 的均值为 4.71, 远远低于中国陆地均值(12.30)^[28] 和中国北方干旱半干旱区的其他研究区, 如毛乌素沙地人工柠条林(10.65~15.56)^[29]、塔克拉玛干沙漠腹地人工林(14.80)^[30]、塔里木盆地北缘绿洲(12.14)^[31] 和古尔班通古特沙漠(8.124)^[32] 等。表明研究区土壤 C 更缺乏, 且土壤 C 源、有机质分解速率和矿化速率较低。土壤 C:P 通常被认为是土壤 P 素矿化能力的标志, 也是衡量微生物矿化土壤有机物质释放 P 或从环境中吸收固持 P 素潜力的一个指标, 其高低对植物生长发育具有重要的影响。较低的 C:P 是土壤 P 有效性高的一个指标^[33]。研究区土壤 C:P 均值为 2.47, 远低于中国陆地平均值(52.70)^[28], 相近于塔克拉玛干沙漠腹地人工林(2.69)^[30]、塔里木盆地北缘绿洲(4.55)^[31] 和古尔班通古特沙漠(3.486)^[32]。表明研究区土壤 P 的有效性相对较高, 矿化速率也相对较高, 微生物分解有机质过程中受 P 的限制可能性较小, 这与陶冶等^[34] 在准噶尔的研究结果相一致。土壤 N 和 P 是限制植物生长的重要元素, 也是植物赖以生存的物质基础和环境条件。土壤 N:P 值可用作 N 饱和的诊断指标, 用于确定养分限制的阈值^[33]。本研究中土壤 N:P 均值为 0.5, 低于中国陆地平均值(3.90)^[28] 和毛乌素沙地人工柠条林(2.46~11.45)^[29], 但与准噶尔荒漠(0.498)^[34]、塔里木盆地北缘绿洲(0.40)^[31] 及古尔班通古特沙漠(0.434)^[32] 等其他干旱半干旱区相近, 表明土壤 N:P 主要受 N 控制, 也进一步验证了研究区土壤 N 极缺乏。AN:AP 值远远高于 TN:TP, 而且随着绿洲化时间的延长, 其值呈先增高后降低趋势, 在第 16 年时达到最大值。这与陶冶等^[32] 的研究结果相似, 古尔班通古特沙漠土壤 AN:AP 远高于 TN:TP, 推测是生物结皮的存在提高了土壤养分, 尤其是有效态 N 含量而导致。通过我们的研究发现, 绿洲化过程中, 由于枯枝落叶含量显著增加, 地表覆盖物相对较厚, 没有土壤结皮存在, 出现这种现象可能是因为沙地向绿洲变化的过程中, 生物量增加, 使得 SOC 和 TN 含量增加, 进而使土壤中可利用的 AN 含量也提高, 以及 N 转化速率较快引起的。土壤 N 和 P 的丰缺直接关系到土壤养分平衡, 而速效养分则能

更加准确地反映营养元素供应水平, 与植物生长发育关系更为密切^[32]。因此, 研究绿洲化过程中的 AN:AP 值变化趋势可为绿洲经营提供一定的基础数据。

与 SOC 和 TN 含量的变化趋势相比, 土壤 C:N 在绿洲化过程中维持相对稳定(初期 4 a 除外), 说明 SOC 和 TN 含量具有较大的空间变异性, 而 C:N 相对稳定, 同时说明了土壤 C:N 相对稳定的基本原则, 即有机物质的形成需要一定数量的 N 与其相应的相对固定比率的 C^[35]。然而, 土壤 C:P, N:P 和 AN:AP 的变化趋势则与 C:N 不同, 随绿洲化时间的增加呈现先增加而后减小的趋势。这可能是因为 C, N, P 元素来源的差异性所致。这同张珂等^[36] 的研究结果相类似, 表明天然生态系统土壤 C:N, C:P 和 N:P 的变化特征也适用于研究区人工林土壤。

3.3 土壤养分含量及化学计量特征的关系

大量的研究表明, 土壤 C, N, P 元素的化学计量比值与 2 个元素值之间具有一定的相关关系, 但显著性存在差别^[27, 29, 31-34, 37-38]。本研究中也得到同样的结果。此外, 从相关系数可以发现, C:N 和 C:P 主要受控于 SOC 含量, N:P 主要受控于 N 含量, 这与陶冶等^[27, 34] 的研究结果相一致, 研究区土壤 C, N, P 化学计量特征主要受控于 C, N 元素。

本研究在一定程度上揭示了绿洲化过程土壤养分及其化学计量特征的变化情况, 为区域生态恢复提供了理论依据和参考。然而, 植被和土壤之间所构成的是一个交互作用的复杂生态系统, 本研究仅仅针对绿洲化过程中土壤养分开展了研究, 而未对植物养分进行测定分析。因此, 今后的工作还应该对土壤环境变化下的植物养分及其化学计量特征变化情况进行研究。

4 结论

(1) 随着绿洲建设时间延长, 研究区土壤 SOC, TN, TP, AN 和 AP 含量均呈极显著增加趋势。但土壤 C 缺乏, 土壤 N 极缺乏, 且土壤碳源、有机质分解速率和矿化速率较低。

(2) 土壤 C, N, P 化学计量比值在绿洲建设初期 4 a 内快速增加, 而后变化趋势有所不同, C:N 相对比较稳定, 变化较小, 而 C:P 和 N:P 呈现减小趋势, AN:AP 在第 16 年达到最大值后也减小。这是因为 C, N, P 元素来源的差异性所致。

(3) 研究区土壤 C, N, P 化学计量特征主要受控于 C, N 元素。

参考文献:

- [1] 朱震达. 荒漠化概念的新进展[J]. 干旱区研究, 1993, 10(4): 8-10.
- [2] 申元村, 汪久文, 伍光和, 等. 中国绿洲[M]. 河南开封: 河南大学出版社, 2001.

- [3] 王涛. 我国绿洲化及其研究的若干问题初探[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 995-998.
- [4] 赵松乔. 人类活动对西北干旱区地理环境的作用: 绿洲化或荒漠化[J]. 干旱区研究, 1987, 4(3): 9-18.
- [5] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.
- [6] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [7] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen phosphorus interactions [J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.
- [8] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [9] 郝玉光. 乌兰布和沙漠东北部绿洲化过程生态效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [10] 徐军, 郝玉光, 刘芳, 等. 乌兰布和沙漠不同下垫面风沙流结构与变异特征 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 95-98.
- [11] 李红丽, 董智, 左合君, 等. 乌兰布和沙漠农田沙害特征及其时空变化规律 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 346-351.
- [12] 罗凤敏, 高君亮, 郝玉光, 等. 乌兰布和沙漠东北缘 5 种土地利用类型土壤粒度特征 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 172-177.
- [13] 罗凤敏, 辛智鸣, 高君亮, 等. 乌兰布和沙漠东北缘近地层风速和降尘量特征 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 147-154.
- [14] 杨晓娟, 廖超英, 孙文艳, 等. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤肥力质量评价 [J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 604-608.
- [15] 黄雅茹, 郝玉光, 董礼隆, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究 [J]. 西北林学院学报, 2018(2): 1-9.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Ross D S, Lawrence G B, Fredriksen G. Mineralization and nitrification patterns at eight northeastern USA forested research sites [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 188(1/3): 317-335.
- [18] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 阴山北麓不同土地利用类型土壤养分特征分析与评价 [J]. 草业学报, 2016, 25(4): 230-238.
- [19] 余海龙, 顾卫, 江源, 等. 半干旱区高速公路边坡不同年代人工植被群落特征及其土壤特性研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 22-25.
- [20] 朱玉伟, 桑巴叶, 王永红, 等. 新疆农田防护林不同林龄生物量及碳储量 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 116-122.
- [21] 赵英铭, 雷渊才, 杨文斌, 等. 农田防护林带主根生物量空间分布 [J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 86-94.
- [22] 栗忠飞, 高吉喜, 王亚萍. 内蒙古呼伦贝尔南部沙带植被恢复进程中土壤理化特性变化 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1739-1751.
- [23] 邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质 [J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 221-229.
- [24] 廖空太, 严子柱, 满多清, 等. 黑河流域防风固沙林生态效益研究: 以甘肃省高台县为例 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 26-29.
- [25] 谭明亮, 段争虎, 陈小红. 流沙地恢复过程中土壤特性演变研究 [J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 685-689.
- [26] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [27] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 305-314.
- [28] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [29] 潘军, 宋乃平, 吴旭东, 等. 荒漠草原不同种植年限人工柠条林土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2015, 41(2): 160-168.
- [30] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [31] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征 [J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [32] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.
- [33] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [34] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 等. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局 [J]. 草业学报, 2016, 25(7): 13-23.
- [35] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: Biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002.
- [36] 张珂, 苏永中, 王婷, 等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(11): 3235-3243.
- [37] 尹秋龙, 寇萌, 焦菊英, 等. 黄上丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 62-66.
- [38] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征 [J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1541-1551.