

DOI: 10.5846/stxb201802060324

周晓兵, 陶冶, 吴林, 李永刚, 张元明. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(3):

Zhou X B, Tao Y, Wu L, Li Y G, Zhang Y M. Soil stoichiometry in different land-use categories in desert-oasis ecotones of the southern Taklimakan Desert. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3):

塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征

周晓兵¹, 陶 冶^{1,2}, 吴 林³, 李永刚¹, 张元明^{1,*}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 安庆师范大学生命科学学院, 皖西南生物多样性研究与生态保护安徽省重点实验室, 安庆 246000

3 湖北民族学院林学院园艺学院, 恩施 445000

摘要: 荒漠绿洲过渡带在维护绿洲生态安全和绿洲稳定上具有重要作用。垦荒等土地利用的增强使得荒漠绿洲过渡带的健康稳定受到了巨大的挑战。以塔克拉玛干沙漠南缘典型荒漠绿洲过渡带为研究对象, 系统分析了不同土地利用方式(桑田、半自然柽柳林、瓜地、棉花-玉米地)对土壤养分化学计量特征的影响。土壤取样沿农田到荒漠方向进行, 分 5 层进行。研究发现, 土壤各养分指标均受土地利用方式(4 种)、土层(5 层)和与农田边缘垂直距离(4 梯度)的显著影响, 且存在一定的交互作用。土地利用方式显著影响土壤各养分元素含量。随土层由浅到深, 有机碳(C)、有效氮(N)和有效磷(P)基本呈下降趋势, 全 N 具有波动变化, 而全 P 变化不显著。随与农田边缘垂直距离的增加, 各养分含量基本呈递减趋势。对同一土层(共选择三层)不同土地利用方式下土壤养分具体分析表明, 棉花-玉米地这一利用方式在农田内部具有最高的土壤有机 C 和全 N 含量, 其次为桑田。随着与农田边缘垂直距离的增加, 土壤 C、N 含量优势减弱。除农田内部样地(0 m)外, 三层土壤全 P 含量基本呈桑田>柽柳林>棉花-玉米地趋势。表层有效 N 含量在农田内部样地(0 m)瓜地最高, 其他距离处(大于等于 20 m)棉花-玉米地高, 下层土壤有效氮含量在农田内部各土地利用方式间无差异。在各距离样点处不同土地利用类型间土壤有效 P 含量的变化无明显规律, 在农田内部以瓜地有效 P 含量最高。棉花-玉米地土壤全量 N/P 在农田内部和与农田边缘垂直距离 20 m 处含量最高。三土层土壤有效 N/P 在农田内部以柽柳林最高, 随着与农田边缘垂直距离增加, 土壤有效 N/P 显著改变。综合来看, 土地利用对荒漠绿洲过渡带土壤营养含量的增加具有正向作用, 由土壤养分变化带来的生态效应值得关注。

关键词: 土地利用; 土层; 农田距离; 土壤化学计量; N/P; 荒漠绿洲过渡带

Soil stoichiometry in different land-use categories in desert-oasis ecotones of the southern Taklimakan Desert

ZHOU Xiaobing¹, TAO Ye^{1,2}, WU Lin³, LI Yonggan¹, ZHANG Yuanming^{1,*}

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Key Laboratory of Biogeography and Bioresources in Arid Land, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Anqing Normal University, College of Life Sciences, The Province Key Laboratory of the Biodiversity Study and Ecology Conservation in Southwest Anhui, Anqing 246000, China

3 School of Forestry and Horticulture, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China

Abstract: Desert-oasis ecotones play a crucial role in the ecological security and stability of oases. The health and stability of desert-oasis ecotones are continuously challenged by increasing land use intensity, particularly the conversion of desert to

基金项目: 中国科学院西部博士项目(XBBS-2014-20); 国家自然科学基金面上基金(41471251); 中国科学院青年创新促进会项目(2015356)资助

收稿日期: 2018-02-06; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn

farmland. Typical desert-oasis ecotones of the southern Taklimakan Desert were selected to study changes in soil nutrients in response to different types of land use: mulberry fields; *Tamarix* forests; melon fields; and cotton-corn fields. Plots were established along transects set out from farmland across the ecotones into the desert, and five soil depths were analyzed. All nutrient indexes were significantly affected by the type of land use, soil depth, and distance from farmland. Soil organic carbon (C), available nitrogen (N) and phosphorus (P) generally decreased with increasing soil depth. No trend was observed for total N, and total P did not vary significantly with increasing soil depth. Most nutrient concentrations decreased with increasing distance from farmlands. In exploring soil nutrients at three different depths in different land use types, we found that soil organic C and total N were the highest in cotton-corn fields, followed by mulberry fields. Organic C and total N decreased with increasing distance from farmland. With the exception of plots located within farmland (0 m), all plots along the transects from all three depths showed a total P trend as follows: mulberry field > *Tamarix* forest > cotton-corn field. In the farmland plots, soil available N from the uppermost depth was the highest in melon field plots, whereas topsoil available N at all other points along the transect was the highest in cotton-corn fields (> = 20 m). Soil available N from lower soil depths did not differ significantly among land use types at any distance along the transect. Despite trends in total P, there were no trends in soil available P from plots at different distances from farmland. However, available P did vary with land use types, with the highest value recorded for farmland melon field plots. For cotton-corn field plots, soil total N/P ratios were the highest in farmlands and in the adjacent to farmland (20 m distance) plots. The highest available N/P ratios were found in farmland plots of *Tamarix* forest. Soil available N/P ratios changed significantly with increased distance from farmland. These results indicate that land use activity, specifically farming, can result in positive effects on soil nutrient levels. Further research should be conducted on the ecological effects of soil nutrient variations in desert-oasis ecotones.

Key Words: land use; soil depth; distance to farmland; soil stoichiometry; desert-oasis ecotone

陆地生态系统过渡带是一块地表覆盖变化强烈、且受全球变化影响较大的区域^[1]。过渡带内小的干扰事件也可能会导致主要物种和群落斑块较大的变化^[2]。荒漠绿洲过渡带是重要的过渡带类型,其形成是因为从绿洲到外部荒漠存在水热环境因子的梯度变化,进而导致植被、土壤、地貌等综合景观展现出过渡特征^[3]。

由于绿洲和荒漠相互作用,荒漠绿洲过渡带在保障绿洲生态安全和维持绿洲内部稳定具有重要作用^[4]。过渡带通常被人类高强度利用,土地利用方式的改变很大程度上影响其动态^[5]。近年来,随着人口的增长,以及过度开垦,荒漠绿洲过渡带遭到了大面积的破坏^[6-7]。过渡带内植被分布面积大量减少^[8, 9],地下水位明显下降,大量区域不断被开垦成耕地^[10]。荒漠绿洲过渡带一旦开发和利用不当,过渡带能够演化成荒漠化的土地或沙丘,进而带来严重的生态环境问题^[8, 11]。因此,了解荒漠绿洲过渡带的属性及其如何响应自然和人为活动的干扰对于有效管护这一脆弱景观非常必要。

荒漠绿洲过渡带土壤生物地球化学循环与土地利用息息相关。土地利用不仅能够改变过渡带植物的多样性^[12],同时也影响土壤养分^[13-15]。荒漠绿洲过渡带开发利用形式多样,如果园、耕地、林地等。土地开垦后,对其管理和投入也各有差异,同样影响土壤养分含量和分布特征^[16]。土地开发对土壤养分含量的影响不仅限于耕地本身;耕地中水分、营养的转移以及人类活动强度的改变,也会对耕地外围区域(即过渡带)土壤养分含量产生影响^[17]。评价土地利用改变对外围区域土壤养分含量的影响,有利于探讨过渡带植物生长和群落变化的原因。然而,目前对上述内容的研究还鲜见报道。

本文旨在利用生态化学计量学方法,研究不同土地利用方式对土壤养分的影响。选择塔克拉玛干沙漠南缘典型的荒漠绿洲过渡带,探讨主要土地利用方式对土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)等元素含量及其化学计量比的影响。研究结果将有助于评估土地利用影响下土壤养分含量的变化,并为预测植物群落特征的变化等提供

数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠南缘和田地区典型的荒漠绿洲过渡带。该区域属于温带大陆性气候,极端干旱少雨。平原地区年降水量不到 60 mm,年潜在蒸发量>2200 mm。年均温 11.5℃,平原区>0℃的年积温 4061—4311℃^[6]。昼夜温差大,年均温日较差 15℃以上。研究区植物稀少,预计不超过 100 种^[18]。土壤多以风沙土为主,约占塔里木盆地南部平原面积的 78.01%,常年风沙活动强烈。风沙土紧邻绿洲,有些风沙土可向南入侵到冲积-洪积扇的上部,甚至紧邻山麓。

1.2 样品采集和分析

根据该区域荒漠绿洲过渡带土地利用的现状,选择 4 种典型的土地利用类型进行采样。4 种类型包括: 1) 桑田,种植桑树 20—30 年左右,位于策勒荒漠草地生态系统国家野外研究站内,定期有浇水管理。周围的过渡带由铁丝网围封,干扰较小,植物保护较好。2) 半自然怪柳林,林龄约 15—20 年,株高 2—3 m,林下土壤被当地居民简单利用,种植寄生药用植物肉从蓉(*Cistanche tubulosa*),已持续 5 年,具有灌溉系统。3) 瓜地,为荒漠边缘新近开发的土地,约 7 年左右,种植相对简单,主要种植西瓜和甜瓜,肥料投入较少,具有滴灌系统,每年根据作物需求灌溉。4) 棉花-玉米种植地,利用 10 年以上,具有高强度的有机肥和化肥施入,主要施用磷酸氢二胺和脲素,管理较好,耕种程度较高。周边有芦苇(*Phragmites communis*)分布。

2015 年 10 月,在 4 种不同的土地利用方式中,按照与农田边缘垂直距离分成农田内部(0 m)、农田边缘(20 m)、农田附近(100 m)和外围荒漠(>500 m)4 个距离梯度来选择样点进行取样(图 1)。利用距离代表每种土地利用方式的影响强度。取样处有灌丛分布时,取样位置尽量选择灌丛间。每个样点 3 个重复样方,间隔 20 m 以上。取样时将土壤表面的凋落物去除,分 5 层取样,取样深度分别为 0—10、20—30、40—50、70—80 cm 和 100—110 cm。样品带回实验室,自然风干后进行养分含量的测定。

土壤有机 C 用重铬酸钾容量法-外加热法,土壤全 N 用凯氏定 N 法,全 P 用酸溶-钼锑抗比色法,有效 N 用碱解蒸馏法,有效 P 用 0.5 mol/LNaHCO₃浸提-钼锑抗比色法进行测定^[19]。

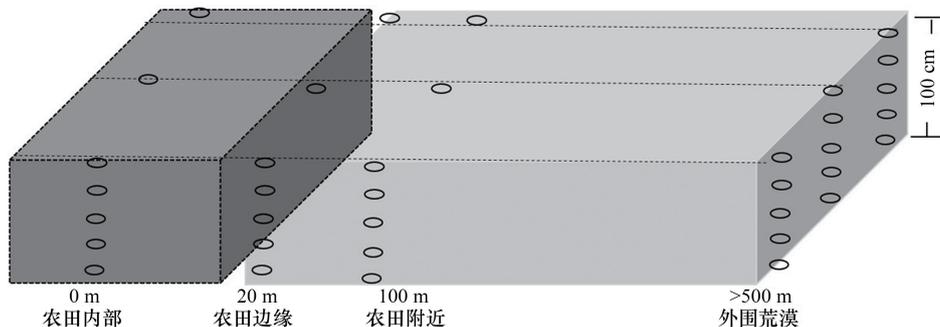


图 1 荒漠绿洲过渡带样品采集示意图

Fig.1 Diagram showing sampling points in the ecotone between desert and oasis

1.3 数据分析

对土壤有机 C、全 N、全 P、有效 N、有效 P、全量 N/P 和有效 N/P 进行统计分析。利用三因素方差分析探讨土地利用方式、土壤深度(土层)和与农田边缘垂直距离及交互作用对各指标的整体影响。对于同一土地利用方式,再利用双因素方差分析探讨土壤深度和距离远近及交互作用的影响。为详细了解各层次土壤化学计量特征变化,我们选择 0—10, 40—50, 100—110 cm 土层,研究这些土层在不同土地利用类型下土壤化学计量差异及不同距离间的差异(双因素方差分析)。对每层土壤同一距离不同利用方式,以及同一利用方式不同距离进行单因素方差分析,利用 Duncan 法进行多重比较,以探讨距离和土地利用方式分别对表层土壤养

分指标的影响。所有方差分析前,检验样本的正态性、方差齐性等前提条件。利用 R 软件(R Studio, Inc.)完成数据分析,利用 Origin 9.0 (OriginLab corporation, MA, USA)完成作图。

2 结果分析

2.1 不同土地利用条件下土层和距离间土壤养分化学计量总体变化特征

分析表明,土地利用类型、土层深度及和与农田边缘垂直距离 3 个因素及其交互作用均能显著影响大部分土壤元素含量及其比值(表 1)。将 4 个土地利用类型分开来分析,具有以下特征:

土壤有机 C 含量在不同的土地利用条件下呈现较一致的趋势,除桉柳林和棉花-玉米地有机 C 含量在深层有一个增加的趋势(图 1)外,其他 3 个土地利用类型土壤有机 C 含量随着土层的增加基本呈下降趋势(图 1),且这一趋势在瓜地和棉花-玉米地表现最显著(图 1)。随着离农田距离的增加,各土地利用类型土壤有机 C 含量呈显著下降趋势(图 1)。

不同土地利用条件下土壤全 N 均具有较强的波动,且在表层表现最为明显(图 2)。一般来讲,土壤表层 N 含量较高,但本研究中土层对全 N 的影响仅在棉花-玉米地显著。具体表现为,在部分距离处,随着深度的增加土壤全 N 呈先下降后增加的趋势(图 2)。除桉柳林外,与农田边缘垂直距离能显著影响其他 3 种土地利用类型土壤全 N 含量,其中在瓜地和棉花-玉米地土壤全 N 含量随距离增加呈显著下降趋势(图 2)。

土壤全 P 含量受土层的影响较小,仅在棉花-玉米地这一土地利用方式下表现显著(图 3)。随着距离的增加,桑田土壤全 P 含量表现为上升的趋势,瓜地表现为下降的趋势,而棉花-玉米地则呈现显著的波动变化特点。

表 1 土地利用类型、土层和距离及交互作用对土壤营养影响的三因素方差分析(F 值)

Table 1 Three-way analysis of variance (ANOVA) on effects of type of land use, soil depth and their interactions on soil nutrients (F value)

来源 Source	有机 C Organic C	全 N Total N	全 P Total P	有效 N Available N	有效 P Available P	N/P	有效 N/P Available N/P
类型 Type	23.77 **	12.56 **	58.89 **	13.62 **	15.41 **	17.53 **	19.01 **
土层 Depth	7.95 **	4.12 **	3.02 *	6.80 **	18.91 **	2.65 *	2.25
距离 Distance	32.26 **	14.72 **	24.06 **	16.06 **	28.24 **	11.35 **	20.46 **
类型×土层 Type×Depth	3.52 **	3.99 **	0.72	5.77 **	2.00 *	3.64 **	3.03 **
土层×距离 Depth×Distance	2.63 **	1.35	0.97	3.60 **	8.11 **	1.16	2.76 **
类型×距离 Type×Distance	5.85 **	4.32 **	6.29 **	4.50 **	16.42 **	3.95 **	8.28 **
类型×土层×距离 Type×Depth×Distance	1.36	1.50 *	0.86	4.06 **	2.17 **	1.34	2.88 **

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

土壤有效 N 随着土层深度的增加基本呈下降趋势(图 4)。土层显著影响桑田和棉花-玉米地土壤有效 N 含量。随着距离的增加,各土层土壤有效 N 具有显著的波动性。各土地利用类型土壤有效 P 含量受土层的影响显著,随着土层的增加总体表现为下降趋势(图 5)。随着距离的变化,瓜地和棉花-玉米地土壤有效 P 含量呈下降趋势(图 5),而桉柳林则具有显著波动变化(图 5)。

2.2 不同土地利用类型和距离对典型土层土壤养分化学计量特征的影响

在五层土壤中,我们选择 0—10, 40—50, 100—110 cm 土层为代表,研究这些土层在不同土地利用类型下土壤化学计量差异及不同距离间的差异。从表 2 可以看出,0—10 cm 土壤,除土壤有效 P 外,其他指标在不同土地利用类型间均差异显著。距离也显著影响所有表层土壤养分指标。40—50 cm 土壤有机质和全氮在各土地利用类型间和不同距离间无显著差异。100—110 cm 土壤,距离不影响土壤有效 P 和 N/P。

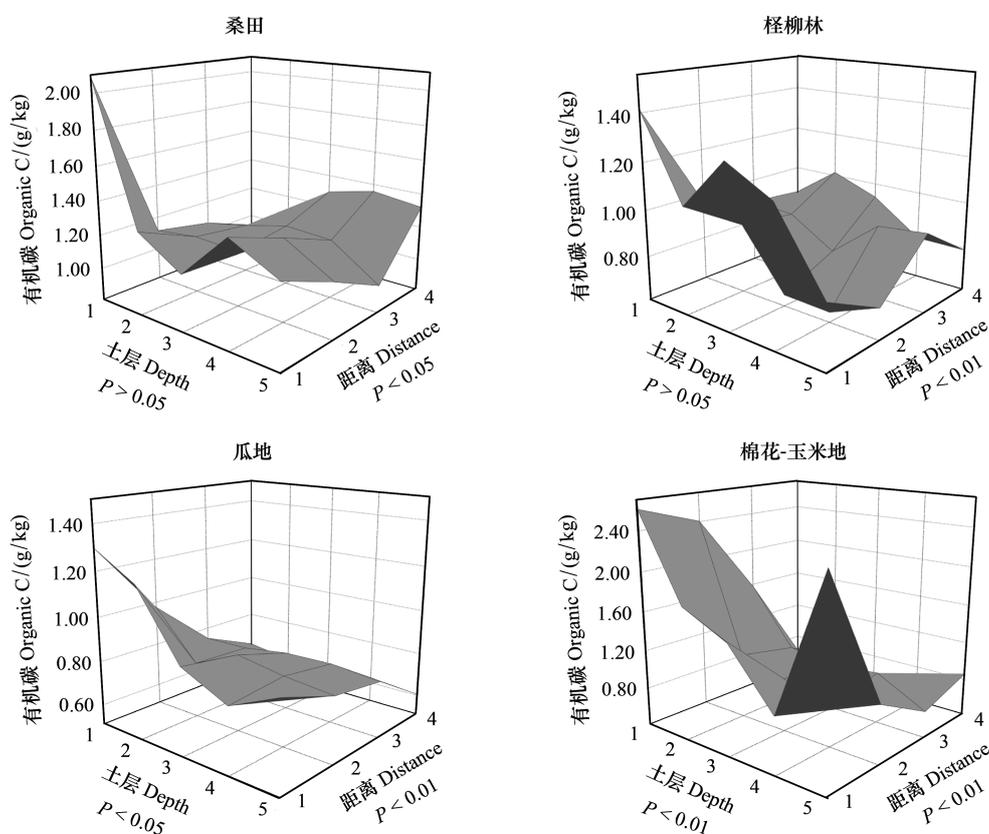


图 2 不同土地利用下土壤有机 C 的垂直和水平特征

Fig.2 Characteristics of soil organic C sampled at different depths, and at different distances from different types of land use

土层:1=0—10 cm, 2=20—30 cm, 3=40—50 cm, 4=70—80 cm, 5=100—110 cm; 距离:1=0 m, 2=20 m, 3=100 m, 4>500 m

表 2 土地利用方式和距离对三土层土壤营养含量影响的双因素方差分析 (F 值)Table 2 Two-way analysis of variance (ANOVA) on effects of type of land use, distance and their interaction on soil nutrients from three depths (F value)

土层 Soil depths	来源 Source	有机 C Organic C	全 N Total N	全 P Total P	有效 N Available N	有效 P Available P	N/P	有效 N/P Available N/P
0—10 cm	类型	13.99**	10.10**	28.74**	9.57**	2.70	11.63**	11.63**
	距离	19.42**	6.95**	17.25**	6.58**	11.97**	4.78**	4.78**
	类型×距离	2.99*	2.70*	5.82**	5.68**	2.95*	2.59*	2.59*
40—50 cm	类型	2.67	1.49	14.12**	5.73**	12.26**	1.91	5.78**
	距离	2.55	2.16	3.41*	5.61**	3.77*	3*	4.44*
	类型×距离	1.16	0.96	1.67	2.1	10.02**	1.18	2.17
100—110 cm	类型	6.48**	4.52**	6.93**	7.7**	5.8**	5.8**	7.4**
	距离	6.65**	3.49*	5.14**	6.25**	1.37	2.29	5.75**
	类型×距离	4.15**	2.58*	1.09	4.1**	3.78**	1.99	4.42**

不同土地利用类型之间对比发现,表层(0—10 cm)土壤中,棉花-玉米地土壤有机 C 含量在与农田 100 m 范围内均具有最高值,除农田内部(0 m)土壤有机 C 外,棉花-玉米地均显著高于其他土地利用类型(表 3)。除桑田附近的荒漠(>500 m 处)具有较高的有机 C 外,各土地利用类型表层土壤有机 C 含量随距离增加均呈下降趋势。40—50 cm 土层中,农田内部有机 C 在各土地利用方式下差异不显著,农田外均以桑田内最高(表 4)。在 100—110 cm 土层中,农田内棉花-玉米地显著高于其他利用类型(表 5)。随着距离增加,各土地利用方式间差异不显著,>500 m 处,桑田最高。三层土壤中的全 N 变化趋势同有机 C 类似。除农田内

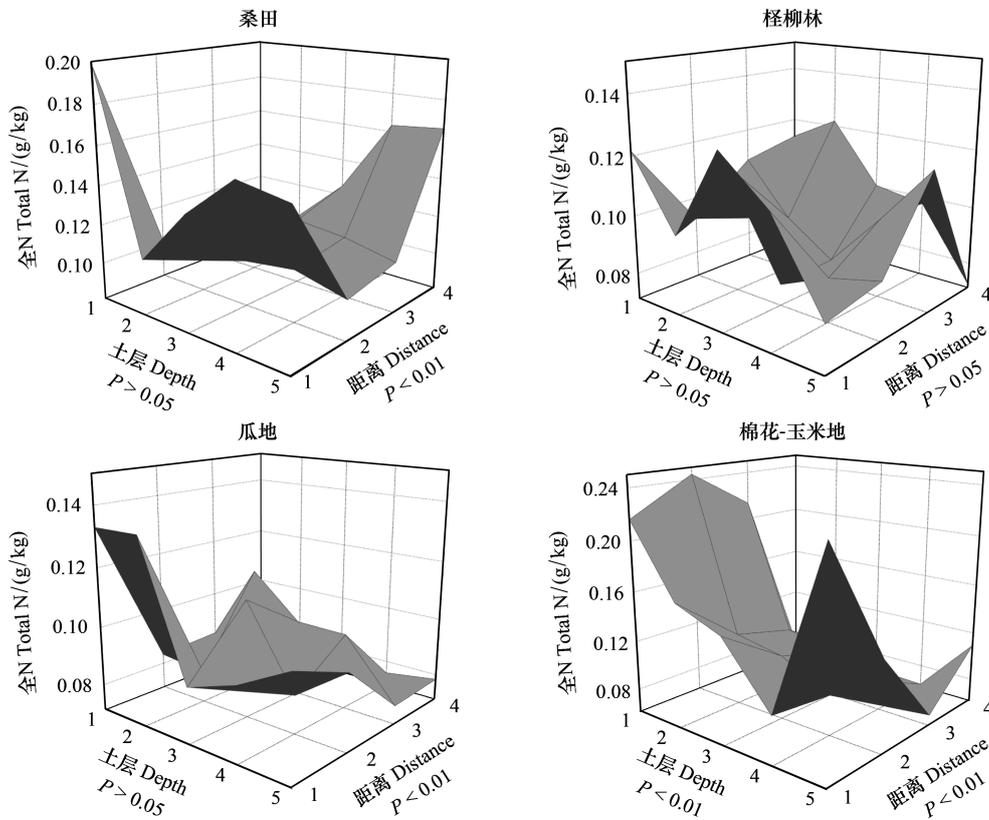


图3 不同土地利用下土壤全 N 的垂直和水平特征

Fig.3 Characteristics of soil total N sampled at different depths, and at different distances from different types of land use

表3 不同土地利用方式不同距离样点 0—10 cm 土层计量化学特征

Table 3 Soil stoichiometry, 0 — 10 cm deep, under different types of land use, along lines from farmland to desert

土层 Soil depths	土地利用方式 Land use types	有机碳 Organic C/ (g/kg)	全 N Total N/ (g/kg)	全 P Total P/ (g/kg)	有效 N Available N/ (mg/kg)	有效 P Available P/ (mg/kg)	N/P	有效 N/P Available N/P
0 m	桑田	2.09±0.28aA	0.20±0.00aA	0.56±0.00aA	20.97±10.99abA	7.55±2.82abA	0.35±0.01aA	2.49±0.39abA
	柽柳林	1.42±0.11bA	0.12±0.01bA	0.49±0.03bA	14.90±4.41abA	3.06±0.50bA	0.25±0.01bA	5.42±1.99aA
	瓜地	1.30±0.10bA	0.13±0.02bA	0.57±0.00aA	38.86±10.07aA	23.41±6.26aA	0.23±0.04bA	2.40±1.43abA
	棉花-玉米地	2.61±0.17aA	0.22±0.01aAB	0.52±0.01abA	6.87±5.34bB	15.27±8.02abA	0.41±0.01aAB	0.33±0.12bB
20 m	桑田	1.12±0.09bB	0.10±0.01bBC	0.58±0.03aA	24.80±12.32abA	3.89±0.48abA	0.17±0.00bB	5.92±2.26aA
	柽柳林	0.97±0.05bB	0.09±0.01bA	0.53±0.01abA	7.69±3.95bA	1.96±0.09bA	0.17±0.02bA	3.78±1.84aA
	瓜地	0.98±0.13bB	0.08±0.01bB	0.53±0.01abB	40.74±6.51abA	3.25±0.57abB	0.16±0.01bA	12.83±1.70aA
	棉花-玉米地	2.41±0.70aA	0.24±0.08aA	0.48±0.01bB	73.38±34.32aB	5.04±1.59aA	0.51±0.16aA	14.03±6.06aB
100 m	桑田	1.06±0.03bB	0.10±0.01bB	0.61±0.01aA	20.12±2.29bB	4.64±0.14aA	0.17±0.01bB	4.35±0.55bA
	柽柳林	0.90±0.09bB	0.11±0.01bA	0.55±0.02bA	5.12±3.70bA	2.50±0.20cA	0.20±0.01bA	1.93±1.35bA
	瓜地	0.75±0.02bBC	0.08±0.01bB	0.51±0.00bB	37.10±8.75bA	2.13±0.04cB	0.17±0.02bA	17.32±3.75bA
	棉花-玉米地	1.57±0.17aAB	0.21±0.05aAB	0.54±0.01bA	196.79±58.40aA	3.59±0.44bA	0.39±0.09aAB	52.35±10.01aA
>500 m	桑田	0.93±0.06aB	0.09±0.00aC	0.58±0.01aA	9.22±1.04aA	3.23±0.26aA	0.15±0.01aC	2.84±0.12aA
	柽柳林	0.88±0.14abB	0.11±0.03aA	0.51±0.02bA	8.25±0.93aA	2.74±0.56abA	0.22±0.05aA	3.49±1.18aA
	瓜地	0.64±0.00bC	0.07±0.00aB	0.42±0.01cC	12.13±10.71aA	1.77±0.26bB	0.17±0.01aA	8.58±7.87aA
	棉花-玉米地	0.62±0.00bB	0.07±0.00aB	0.41±0.00cC	15.91±8.10aB	2.11±0.08abA	0.17±0.01aB	7.89±4.17aB

不同小写字母表示同一距离不同土地方式间差异显著;不同大写字母表示同一土地利用类型不同距离间差异显著

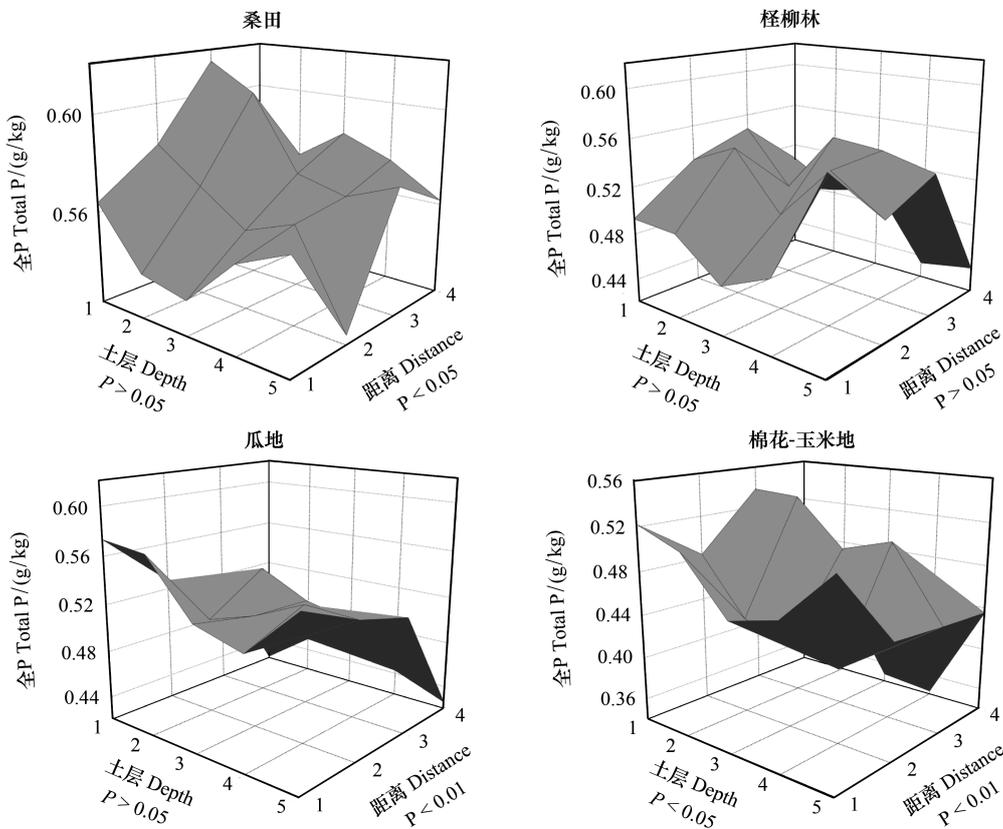


图4 不同土地利用下土壤全P的垂直和水平特征

Fig.4 Characteristics of soil total P sampled at different depths, and at different distances from different types of land use

部土壤外,三层土壤中距农田不同距离样点土壤全P含量基本呈桑田>柽柳林>棉花-玉米地趋势(表3—5)。随着距离的变化,0—10 cm和40—50 cm土层,桑田和柽柳林两种土地利用类型间差异不显著,而瓜地和棉花-玉米地则基本呈下降趋势。100—110 cm土层,桑田和棉花-玉米地各距离间差异不显著,其他两类型呈现递减趋势。

0—10 cm土层中,除农田内部样地外,土壤有效N含量在不同距离均呈棉花-玉米地>瓜地>桑田>柽柳林的趋势(表3)。随距离增加,桑田、柽柳林及瓜地土壤有效N含量无差异,而棉花-玉米地则先增加后降低。40—50 cm土层,不同距离处各土地利用方式间变化不同,20 m和100 m样点处瓜地和桑田相对较高(表4)。农田内部(0 m)有效N含量基本小于其他距离样点。100—110 cm土层,20 m和100 m样点处有效N含量以瓜地最高,其他样点不同类型差异不显著(表5)。随着距离的增加,桑田和棉花-玉米地有效N含量差异不显著。其他两土地利用方式中,农田内部土壤有效N也最低。各距离样点不同土地利用类型的有效P含量变化无明显规律,但三层土壤变化趋势相似,0 m处均以瓜地有效P最高(表3—5)。

三层土壤N/P在4种土地利用类型中变化趋势相似(表3—5)。棉花-玉米地土壤全量N/P在农田内部(0 m)和20 m两样点上均最高。0—10 cm和40—50 cm土层,外围荒漠(>500 m)各土地利用类型间土壤全量N/P均无显著差异。随距离增加,表层0—10 cm,桑田土壤全量N/P呈递减趋势,柽柳林和瓜地变异不明显(表3)。在更深的土层,随距离增加,全量N/P差异不大。在农田内部(0 m),三土层土壤有效N/P以柽柳林最高;20 m处,表层各利用方式差异不显著,下层土壤瓜地较高(表3—5)。在100 m距离处,表层以棉花-玉米地最高,下层土壤瓜地较高。500 m处各土地利用方式间差异不显著。

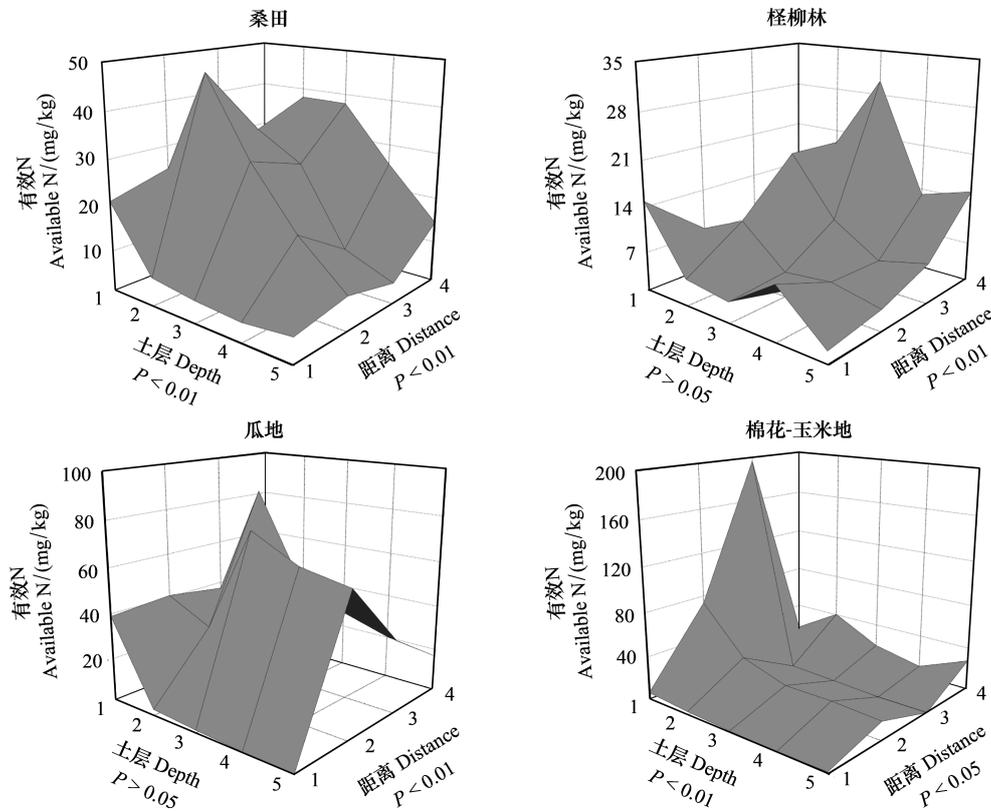


图 5 不同土地利用下土壤有效 N 的垂直和水平特征

Fig.5 Characteristics of soil available N sampled at different depths, and at different distances from different types of land use

表 4 不同土地利用方式不同距离样点 40—50 cm 土层计量化学特征

Table 4 Soil stoichiometry, 40—50 cm deep, under different types of land use, along lines from farmland to desert

土层 Soil depths	土地利用方式 Land use types	有机碳 Organic C/ (g/kg)	全 N Total N/ (g/kg)	全 P Total P/ (g/kg)	有效 N Available N/ (mg/kg)	有效 P Available P/ (mg/kg)	N/P	有效 N/P Available N/P
0 m	桑田	1.14±0.24aA	0.14±0.04aA	5.89±1.71aB	0.54±0.03aA	1.51±0.09bB	0.25±0.06aA	3.89±1.14abA
	桤柳林	1.28±0.12aA	0.13±0.01aA	4.19±0.22aB	0.46±0.03aA	0.74±0.24bB	0.28±0.04aA	6.97±2.06aB
	瓜地	0.89±0.03aA	0.09±0.01aA	2.24±0.34aB	0.52±0.01aA	8.52±2.15aA	0.17±0.02aA	0.30±0.09bB
	棉花-玉米地	1.54±0.63aA	0.15±0.05aA	2.33±1.34aA	0.46±0.04aAB	1.80±0.16bA	0.31±0.08aA	1.24±0.66bA
20 m	桑田	1.14±0.01aA	0.10±0.00aA	30.53±3.97abAB	0.55±0.02aA	3.23±0.60aA	0.19±0.01aA	9.97±1.87abAB
	桤柳林	0.66±0.02bB	0.08±0.01aB	4.87±3.51bB	0.50±0.04abA	1.21±0.07bAB	0.16±0.02aA	3.85±2.72bB
	瓜地	0.86±0.04abA	0.11±0.03aA	77.30±33.74aA	0.52±0.00abA	2.16±0.18abB	0.22±0.05aA	36.56±16.42aA
	棉花-玉米地	0.96±0.26abA	0.11±0.03aA	19.66±18.66abA	0.42±0.04bAB	1.54±0.32bA	0.26±0.04aA	9.38±8.56abA
100 m	桑田	1.18±0.06aA	0.12±0.01aA	26.76±8.21bAB	0.57±0.02aA	3.30±0.30aA	0.20±0.02aA	7.93±2.30bAB
	桤柳林	0.76±0.08bB	0.08±0.00bB	9.98±3.39bcB	0.55±0.05aA	1.35±0.27bAB	0.15±0.01bA	7.21±1.98bcB
	瓜地	0.78±0.07bA	0.10±0.01abA	47.88±5.29aB	0.51±0.01aA	1.79±0.06bB	0.19±0.01abA	26.65±2.22aB
	棉花-玉米地	0.89±0.03bA	0.10±0.01abA	2.91±1.10cA	0.49±0.00aA	1.58±0.22bA	0.20±0.01aA	1.71±0.47cA
>500 m	桑田	1.29±0.33aA	0.13±0.02aA	37.89±11.83aA	0.58±0.02aA	2.78±0.45aAB	0.22±0.04aA	12.98±2.08aB
	桤柳林	0.94±0.16abAB	0.10±0.00abAB	30.18±4.50aA	0.49±0.03abA	1.54±0.03bA	0.20±0.00aA	19.50±2.56aA
	瓜地	0.60±0.01bB	0.07±0.00bcA	28.59±11.64aB	0.45±0.03bB	1.64±0.17bB	0.16±0.01aA	18.84±9.26aB
	棉花-玉米地	0.58±0.01bA	0.06±0.00cA	18.76±1.17aA	0.35±0.03cB	1.77±0.11bA	0.19±0.02aA	10.63±0.02aA

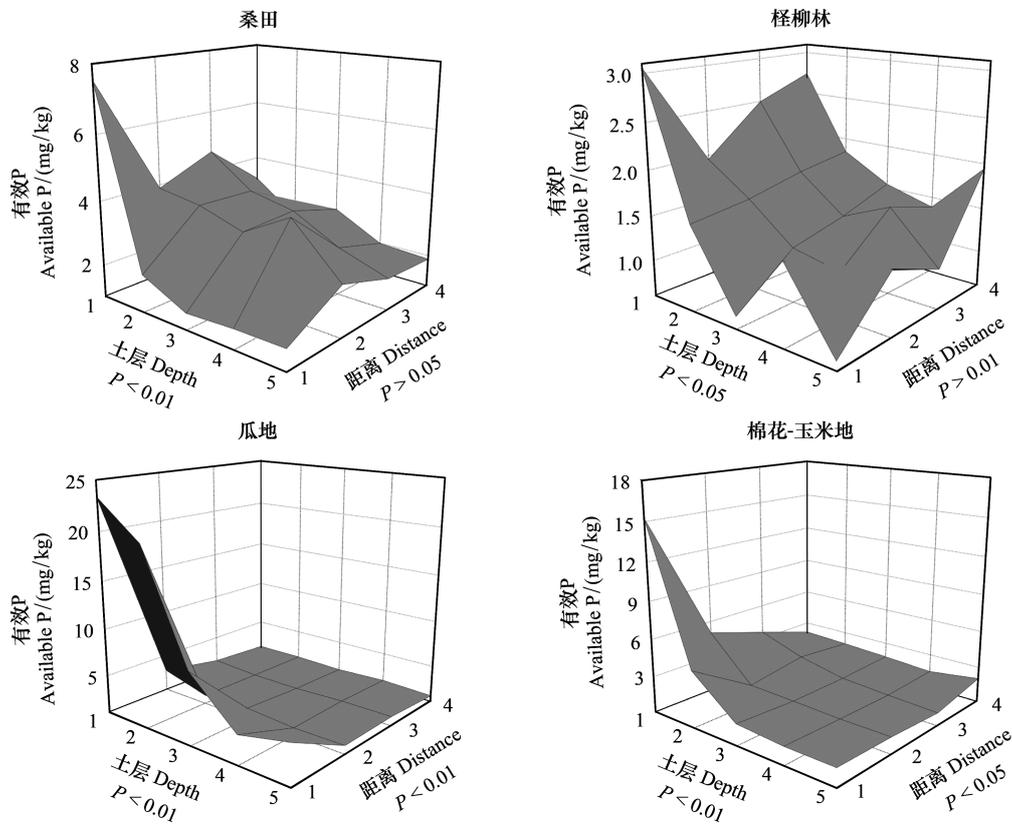


图 6 不同土地利用下土壤有效 P 的垂直和水平特征

Fig.6 Characteristics of soil available P sampled at different depths, and at different distances from different types of land use

表 5 不同土地利用方式不同距离样点 100—110 cm 土层计量化学特征

Table 5 Soil stoichiometry, 100—110 cm deep, under different types of land use, along lines from farmland to desert

土层 Soil depths	土地利用方式 Land use types	有机碳 Organic C/ (g/kg)	全 N Total N/ (g/kg)	全 P Total P/ (g/kg)	有效 N Available N/ (mg/kg)	有效 P Available P/ (mg/kg)	N/P	有效 N/P Available N/P
0 m	桑田	1.28±0.21bA	0.16±0.04abA	6.42±3.80aA	0.57±0.04aA	1.64±0.34bB	0.27±0.07abA	4.57±2.59aA
	柽柳林	0.87±0.04bA	0.09±0.01bA	2.89±0.63aB	0.57±0.04aA	0.70±0.07bC	0.15±0.02bA	4.36±1.39aA
	瓜地	0.90±0.07bA	0.11±0.01bA	0.95±0.02aC	0.55±0.01aA	5.24±1.99aA	0.19±0.02bA	0.23±0.06aC
	棉花-玉米地	2.37±0.53aA	0.23±0.06aA	2.60±0.93aA	0.51±0.00aA	1.53±0.08bAB	0.44±0.11aA	1.64±0.52aA
20 m	桑田	1.13±0.11aA	0.10±0.01aA	8.47±2.38bA	0.53±0.01aA	2.57±0.27aA	0.19±0.01aA	3.25±0.84bA
	柽柳林	0.74±0.03aA	0.09±0.01aA	4.26±2.36bB	0.52±0.02aAB	1.31±0.03bB	0.17±0.01aA	3.31±1.85bA
	瓜地	0.80±0.05aAB	0.10±0.02aA	62.38±14.00aA	0.53±0.00aA	1.89±0.16bAB	0.18±0.03aA	32.32±5.37aA
	棉花-玉米地	1.00±0.23aB	0.13±0.03aAB	17.56±13.08bA	0.44±0.04bA	1.41±0.18bB	0.30±0.08aAB	10.80±7.15bA
100 m	桑田	0.97±0.15aA	0.11±0.02aA	5.61±1.22bA	0.57±0.00aA	1.98±0.10aAB	0.19±0.04aA	2.86±0.69bA
	柽柳林	0.95±0.23aA	0.12±0.04aA	7.17±3.16bB	0.54±0.02abAB	1.05±0.17bBC	0.22±0.07aA	6.62±2.88bA
	瓜地	0.76±0.11aAB	0.08±0.00aA	33.06±5.53aAB	0.52±0.01abA	1.99±0.06aAB	0.15±0.01aA	16.63±2.78aB
	棉花-玉米地	0.68±0.05aB	0.07±0.00aB	0.94±0.01bA	0.44±0.07bA	1.14±0.14bB	0.17±0.04aB	0.85±0.09bA
>500 m	桑田	1.32±0.03aA	0.17±0.01aA	14.46±6.04aA	0.56±0.03aA	1.88±0.06aAB	0.30±0.01aA	7.49±3.01aA
	柽柳林	0.79±0.12bA	0.07±0.01cA	15.21±0.94aA	0.44±0.05bB	1.95±0.26aA	0.16±0.00bA	8.26±1.64aA
	瓜地	0.61±0.02bB	0.08±0.00bcA	16.88±11.18aBC	0.43±0.02bB	1.64±0.04aB	0.19±0.01bA	10.10±6.57aBC
	棉花-玉米地	0.86±0.16bB	0.11±0.02bB	27.87±13.26aA	0.44±0.03bA	2.06±0.22aA	0.25±0.03aAB	12.44±5.20aA

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤化学计量特征的影响

研究不同土地利用方式对土壤养分含量的影响,有利用土壤养分可持续利用管理^[20]。不同的土地利用方式对土壤营养特征的影响不同。与外围荒漠相比,荒漠绿洲过渡带的人为垦殖活动使土壤肥力有所增加,各营养元素含量均具有显著增加的趋势。绿洲边缘不同土地开发对表层土壤养分含量的促进作用已被诸多研究所证实^[16]。

整体来看,桑田和棉花-玉米地具有较高的有机 C 和全 N,显著高于其他两种土地类型。开发年限较久或者投入管理水平较高,造成了这两种利用类型土壤全 N 含量高,有机质丰富。瓜地由于新开发不久,且肥料投入水平低,植株长势及其瓜产量较小,土壤养分积累较少,进而导致其土壤有机 C 含量和全 N 含量较低。桂东伟等研究也表明,位于绿洲边缘的新垦农田在土壤养分含量评价中均处于较低水平,而绿洲内部农田则处于相对较高水平^[21],这与本研究结果相一致。土壤全 P 对不同土地利用的响应具有和有机 C 以及全 N 不同的模式,表现为桑田和瓜地较高。这可能与土壤管理过程中施用的化肥种类或者植物凋落物种类及分解速率有关。桑田位于围栏之内,大量的落叶形成凋落物层,这些凋落物在没有人工干扰的条件下大部分分解进入土壤,使得有机 C、全 N 和全 P 含量较高。土壤有效 N 和有效 P 含量在各土地利用下具有不同的大小特征,可能因为其含量受瞬时环境的影响较大。例如,采样时植物的吸收利用、土壤水分条件等有密切关系^[22]。

N/P 是确定植物和土壤营养限制的重要指标。在本研究中,土壤全量 N/P 在土地利用下增加,这一研究结果与其他的一些研究结果相一致^[23]。新开垦土地高的 N 肥输入形成高的土壤 N/P。在自然状态下,P 的化学特征与 N 不同,其非常稳定,能够吸附在土壤中,不易变化^[24]。因此,土壤 P 的变化也可能来自于外源磷元素的输入,尤其是施肥(如磷酸氢二胺)的瓜地和棉花玉米地两种土地利用方式。在本研究中,尽管外围荒漠(> 500 m 处)土壤 N/P 有所增加,但值均小于 1,远低于森林(6.05)^[25]、农业(1—6)^[23]或者温带荒漠生态系统的平均值(1.2)^[26]。因此,土地利用并未改变土壤养分限制的现状,绿洲荒漠过渡带仍主要受到缺 N 的限制。

3.2 不同土地利用下土壤化学计量特征的垂直和水平变化

土地利用对土壤养分含量的改变,不仅停留在表层,可能向下传递影响深层土壤^[16]。同时,土地利用的转化,造成农田附近的土壤养分发生变化,从而影响到与之密切相关的植物、微生物过程^[17]。在本研究中,尽管整体上土层对土壤各营养成分具有显著影响,但分成不同土地利用方式后分析发现,土层对养分的影响随土地利用程度不同而具有较大差异性。土地利用程度最高的棉花-玉米地,土层深度显著影响各元素含量。这与该土地利用类型具有经常性的耕作活动,土壤表层有大量的有机肥或化肥的投入有关^[13]。桑田和柽柳林两种土地利用方式下有机 C、全 N 和全 P 响应土层变化的程度较小,因为这两种土地利用方式下,土壤表面的人工施肥管理干预较少,无外源化肥投入,使得各土层之间养分含量差异较小。有效养分对土层变化响应比较敏感,这可能与不同土层接触不同的水热等环境条件,进而造成有效养分转化过程的差异有关^[27-28]。

就不同距离比较来看,距离能够影响各土地利用方式下大部分营养指标。总体表现为距离越远,差异越大,养分指标也基本呈现梯度递减趋势。研究表明,土地利用的加强除能够影响农田本身的营养元素外,也能影响与之相近的区域。王蕙研究也发现,随着距离绿洲越来越远,土壤水分、植物盖度、生长、植株密度以及多样性均具有梯度变化,且大部分呈现下降趋势^[17]。桂东伟等在研究土地利用方式改变对土壤养分含量影响时,提出了基于土地利用下土壤指标值与外围荒漠样地值变化差异的土壤相对质量指数,据此研究发现,土地利用强度最高、投入最大的棉田具有较高的相对质量指数^[16]。按此方法,本研究也将呈现越靠近农田土壤相对质量指数越高的趋势。这种土地开发利用对周边区域土壤养分含量的改变,可能影响到群落的演替进程^[29]。

其他一些区域,如热带和温带的研究表明,由林地、灌木和草地向人工垦殖转变过程中,土壤养分出现明

显的退化现象^[14,30]。这些研究结果与本研究中发现荒漠绿洲过渡带转化成农田后,营养物质增加的结果不同。这种差异的根本原因就在于垦殖前土壤养分含量或土壤贫瘠程度的差异。在干旱荒漠区,土壤养分原本就十分贫瘠,因此,土地利用的转变和管理的增加可以适当改善土壤养分含量。但是这种转化的长期效果能否维持,与之相对应的地下水资源的供给如何变化等问题,有待更加全面深入的研究。

4 结论

土地利用方式、土层和农田边缘垂直距离均能显著影响土壤养分含量。土地利用过程中,土地利用方式的变化显著影响土壤养分含量的变异程度。投入最高的棉花-玉米地及其附近区域的表层土壤具有较高的有机 C 和全 N 含量,与外围荒漠相比,该利用方式对土壤营养的影响也最大。土壤有效 N 和有效 P 与全 N 和全 P 对土层和距离变化的响应不同,有效养分可能更多地受立地条件的影响。随着与农田边缘垂直距离增加,土地利用的影响逐渐减弱。因此,从土壤养分含量角度来讲,土地利用改善了荒漠土壤营养缺乏的现状,但这种改变具有怎样的生态学意义,是否对生态系统的稳定具有促进作用,需要进行进一步研究。

致谢:感谢王敬竹和朱秉坚在野外工作给与的协助。感谢策勒荒漠草地生态系统国家野外研究站提供的支持。感谢澳大利亚麦考瑞大学 Alison Downing 教授对英文摘要的校正。

参考文献 (References):

- [1] Di Castri F, Hansen A J, Holland M M. A new look at ecotones; emerging international projects on landscape boundaries. Paris: International Union of Biological Science, 1988.
- [2] Sottile G D, Meretta P E, Tonello M S, Bianchi M M, Mancini M V. Disturbance induced changes in species and functional diversity in southern Patagonian forest-steppe ecotone. *Forest Ecology and Management*, 2015, 353: 77-86.
- [3] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 庞营军, 邢文娟, 杨发相, 刘国军, 毛东雷, 岳健. 再议绿洲-沙漠过渡带——以策勒绿洲-沙漠过渡带为例. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 195-202.
- [4] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, Zhang Z H, Wang T, Ram R. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region; a case study in Hexi Corridor, northwest China. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 117-124.
- [5] Kitzberger T. Ecotones as complex arenas of disturbance, climate, and human impacts: the trans-andean forest-steppe ecotone of Northern Patagonia//Myster R W, ed. *Ecotones Between Forest and Grassland*. New York, NY: Springer, 2012: 59-88.
- [6] 张希明, Runge M. 塔克拉玛干沙漠边缘植被可持续管理的生态学基础. 北京: 科学出版社, 2006: 188-188.
- [7] 任晓, 穆桂金, 徐立帅, 林永崇, 赵雪. 塔里木盆地南缘 2000-2013 年人工绿洲扩张特点. *干旱区地理*, 2015, 38(5): 1022-1030.
- [8] Ma Q L, Wang J H, Li X R, Zhu S J, Liu H J, Zhan K J. Long-term changes of *Tamarix*-vegetation in the oasis-desert ecotone and its driving factors: implication for dryland management. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59(4): 765-774.
- [9] 马瑞, 王继和, 屈建军, 胡小柯, 刘虎俊. 1960—2005 年民勤典型绿洲-荒漠过渡带景观格局与动态. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 714-722.
- [10] 潘光耀, 穆桂金, 岳健, 贺俊霞, 孙琳. 2001—2010 年策勒绿洲-沙漠过渡带的变化及其成因. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 169-175.
- [11] Ding J L, Zhang Y. Vegetation actualities and feasibility of restoration for the periphery of oasis in extreme arid region; taking Qira County of Xinjiang as an example. *Ecological Economy*, 2006, 2(2): 183-189.
- [12] Walker J S, Grimm N B, Briggs J M, Gries C, Dugan L. Effects of urbanization on plant species diversity in central Arizona. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(9): 465-470.
- [13] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 穆桂金, 杨发相. 绿洲化进程中不同利用强度农田对土壤质量的影响. *生态学报*, 2010, 30(7): 1780-1788.
- [14] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 161-193.
- [15] Meglioli P A, Aranibar J N, Villagra P E, Riveros V C. Spatial patterns of soil resources under different land use in *Prosopis* woodlands of the Monte desert. *CATENA*, 2017, 149: 86-97.
- [16] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 穆桂金, 杨发相, 朱军涛. 绿洲边缘不同土地利用方式下的土壤质量变化及分析. *环境科学*, 2010, 31(9): 2248-2253.
- [17] 王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异. *生态学报*, 2007, 27(5): 1731-1739.

- [18] 张立运, 夏阳. 塔克拉玛干沙漠南缘生态环境的特点及治理问题. 干旱区资源与环境, 1994, 8(1): 72-79.
- [19] Chen Y N, Wang Q, Li W H, Ruan X. Microbiotic crusts and their interrelations with environmental factors in the Gurbantonggut desert, western China. *Environmental Geology*, 2007, 52(4): 691-700.
- [20] Gong J, Chen L, Fu B, Huang Y, Huang Z, Peng H. Effect of land use on soil nutrients in the loess hilly area of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2006, 17(5): 453-465.
- [21] 桂东伟, 穆桂金, 雷加强, 曾凡江, 王辉. 干旱区农田不同利用强度下土壤质量评价. 应用生态学报, 2009, 20(4): 894-900.
- [22] Vourlitis G L, DeFotis C, Kristan W. Effects of soil water content, temperature and experimental nitrogen deposition on nitric oxide (NO) efflux from semiarid shrubland soil. *Journal of Arid Environments*, 2015, 117: 67-74.
- [23] Lou H Z, Yang S T, Zhao C S, Wang Z W, Shi L H, Wu L N, Dong G T, Cai M Y, Hao F H, Sun Y. Using a nitrogen-phosphorus ratio to identify phosphorus risk factors and their spatial heterogeneity in an intensive agricultural area. *CATENA*, 2017, 149: 426-436.
- [24] Xue Q Y, Dai P B, Sun D S, Sun C L, Qi L Y, Ostermann A, He Y, Lin X Y. Effects of rainfall and manure application on phosphorus leaching in field lysimeters during fallow season. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(9): 1527-1537.
- [25] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [26] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [27] Zhao F Z, Kang D, Han X H, Yang G H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415-422.
- [28] Fallahzade J, Hajabbasi M A. The effects of irrigation and cultivation on the quality of desert soil in central Iran. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(1): 53-61.
- [29] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1257-1266.
- [30] Wang J, Fu B J, Qiu Y, Chen L D. Analysis on soil nutrient characteristics for sustainable land use in Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2003, 54(1/2): 17-29.