

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

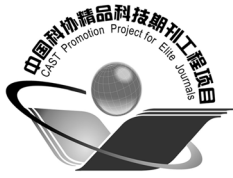


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

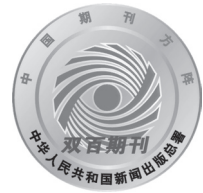
第52卷 第6期

Vol.52 No.6



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

综述与评论

- 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑····· 赵彦锋 程道全 陈 杰等 (1197)
 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展····· 卢明珠 吕宪国 管 强等 (1209)

研究论文

- 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素····· 杨 帆 黄来明 李德成等 (1226)
 中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性····· 任圆圆 张学雷 (1237)
 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征····· 于 洋 赵业婷 常庆瑞 (1251)
 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演····· 李 萍 赵庚星 高明秀等 (1262)
 干湿交替对黄土崩解速度的影响····· 王 健 马 璠 张鹏辉等 (1273)
 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟····· 吴奇凡 樊 军 杨晓莉等 (1280)
 旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征····· 孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰等 (1291)
 流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响····· 李忠意 徐仁扣 (1301)
 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析····· 于 飞 施卫明 (1311)
 太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化····· 刘建玲 贾 可 廖文华等 (1325)
 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性····· 杨 文 周脚根 王美慧等 (1336)
 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征····· 李红林 贡 璐 朱美玲等 (1345)
 东北平原土壤硒分布特征及影响因素····· 戴慧敏 宫传东 董 北等 (1356)
 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究····· 林维雷 应雨骐 姜培坤等 (1365)
 土壤非多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应····· 马静静 钱新春 张 伟等 (1374)
 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究····· 赵丽娅 李文庆 唐龙翔等 (1383)
 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应····· 张体彬 康跃虎 万书勤等 (1392)
 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应····· 杨晓玲 丁文魁 马中华等 (1401)
 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究····· 李杰彪 苏 锐 周志超等 (1412)

研究简报

- 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究····· 宋金红 吴景贵 赵欣宇等 (1422)
 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估····· 单 燕 李水利 李 茹等 (1430)
 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用····· 赵 纯 袁国富 刘 晓等 (1438)

信息

- 《土壤学报》入选“2015期刊数字影响力100强”····· (1437)

封面图片：滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地（由张体彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201411220585

塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征*

李红林^{1, 2} 贡璐^{1, 2†} 朱美玲^{1, 2} 刘曾媛^{1, 2} 解丽娜^{1, 2} 洪毅^{1, 2}

(1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

(2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要 选择塔里木盆地北缘阿拉尔垦区灌漠土、棕漠土、盐土和风沙土四种土壤为研究对象, 在分析土壤C、N、P化学计量特征基础上, 利用排序方法中的冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 技术深入解析了土壤C、N、P含量及其化学计量比与其他理化因子的关系。结果表明: 研究区土壤C、N、P含量整体水平不高, 土壤C、N、P元素含量均值分别为2.97、0.27、0.64 mg g⁻¹。由C、N、P含量的相关性分析可知C、N元素含量变化几乎同步, P元素含量变化滞后于二者。C:N:P为11:1:2.37, 在四种土壤类型中N:P、C:P较C:N变化范围大, 土壤C、N、P计量比表明N是研究区主要的限制因素。冗余分析结果表明, 土壤含水量是土壤C、N、P含量及其化学计量比变化的主要驱动因子, 土壤含水量与土壤C、N元素含量和N:P、C:P呈现极显著正相关关系, 土壤容重与土壤C、N元素含量和N:P、C:P呈现极显著负相关关系; 土壤盐度对土壤C、N、P含量及其化学计量比的影响并未达到显著程度, 可能是因为研究区土壤本身盐碱性差异不大。

关键词 绿洲土壤; 土壤化学计量学; 土壤养分; 塔里木盆地

中图分类号 S154.2 **文献标识码** A

作为陆地生态系统的重要组分, 土壤与生物的生存和发展密切相关, 其碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 元素是生物体体内元素的主要来源, 在生态系统物质循环以及多元素平衡过程中发挥着重要作用^[1-2]。生态化学计量学 (Ecological stoichiometry) 结合了生态学和化学计量学的基本原理, 可分析多重化学元素的质量平衡对生态交互作用的影响^[3-4]。研究土壤化学计量特征对揭示养分的可获得性以及C、N、P等元素的循环和平衡机制具有重要的科学意义^[5]。

生态化学计量学理论最早始于水生生态系统, 之后在陆地生态系统得到广泛应用。国内外学者聚焦于森林、草原、湿地等生态系统的植被生态化学计量特征开展了一系列研究^[6-13], 而对于土壤化学计量特征的研究相对较少^[14-16], 尤其是干旱区绿洲的成果匮乏。

塔里木河上游阿拉尔垦区位于塔里木盆地北缘, 地处干旱区腹地, 生态环境十分脆弱。该区水资源短缺、盐渍化问题突出, 土壤蓄水保肥能力减弱, 加剧了C、N、P元素的流失。土壤C、N、P元素含量及其比值特征研究对绿洲土壤生态系统物质循环及多元素平衡有着重要的指示作用。近年来已有众多学者围绕该区土壤系统的沙化、盐化以及养分贫瘠化等问题开展了大量的研究工作^[17-20], 而对土壤C、N、P化学计量特征的研究少见文献。本研究以塔里木河上游阿拉尔垦区为靶区, 系统分析绿洲4种主要土壤类型 (灌漠土、棕漠土、盐土及风沙土) C、N、P化学计量特征, 并结合数量生态学的冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 技术探讨该特征与其他理化因子的相关性, 试图揭示不同土壤类型间土壤C、N、P化学计量特征的变化规律及其对其他理化因子的响应关系, 以

* 国家自然科学基金项目 (41461105) 资助

† 通讯作者, E-mail: gonglu721@163.com

作者简介: 李红林 (1992—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态研究。E-mail: lihonglin205@163.com

收稿日期: 2014-11-22; 收到修改稿日期: 2015-01-27

期为进一步阐明该区植被与土壤的生态化学计量特征关系提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区地处塔里木盆地北缘,天山中段南麓,东经 $80^{\circ}30' \sim 81^{\circ}58'$ 、北纬 $40^{\circ}22' \sim 40^{\circ}57'$ 。位于塔里木河上游阿克苏河与叶尔羌河的冲积平原上,平均海拔为1 012 m。属典型的暖温带大陆性干旱荒漠气候,年均气温 $10.6^{\circ}\text{C} \sim 11.5^{\circ}\text{C}$,昼夜温差大, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $4\ 201^{\circ}\text{C}$;降水稀少,年均降水量 $17.4 \sim 42.8\text{ mm}$;蒸发强烈,年均蒸发量 $1\ 125 \sim 1\ 600\text{ mm}$;热量与光照十分丰富,年均光辐射量 $6\ 000 \sim 6\ 200\text{ MJ m}^{-2}$ 。属灌溉农业区,现辖新疆生产建设兵团农一师的10个大型农垦团场及新疆阿克苏市托喀依乡,其主要土壤类型为灌漠土、棕漠土、盐土和风沙土,土壤较为贫瘠。

1.2 试验方法

样区设置在阿拉尔垦区农一师十二团,采样时间为2013年7月。选择样区内同一海拔高度的4种土壤类型,即灌漠土(植被覆盖度在 $80\% \sim 90\%$,主要植被类型为棉花*Gossypium*,分布于绿洲内部)、棕漠土(植被覆盖度在 $20\% \sim 30\%$,主要植被类型为怪柳*Tamarix ramosissima*、骆驼刺*Alhagi sparsifolia*、芦苇*Phragmites communis*等,分布于绿洲与荒漠交错带)、盐土(植被覆盖度在 $30\% \sim 40\%$,主要植被类型为盐穗木*Halostachys caspica*、盐爪爪*Kalidium foliatum*,分布于农田外围)及风沙土(植被覆盖度小于 5% ,主要植被类型为骆驼刺*Alhagi sparsifolia*,分布于塔克拉玛干沙漠边缘)进行采样。在遵循典型性、代表性的原则下对每种土壤类型选取5个样方,样方面积均为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。每个样方按照S型设置5个样点,采集各样点表层土壤样品($0 \sim 20\text{ cm}$),将5个样点采取的土样去除石块及植物根系,充分混匀后按四分法取 1 kg 土样入袋,封装好带回实验室,风干后研磨过筛,以供实验分析使用。

本研究选择的土壤化学计量特征指标为土壤C、N、P元素含量以及C:N、N:P、C:P比值,其他理化因子指标为土壤含水量、容重、pH、全

盐和电导率。具体测试方法为:土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法;全氮采用凯氏定氮法;全磷采用钼锑抗比色法;土壤含水量采用烘干法;容重采用环刀法;pH采用电位计法;土壤全盐由八大离子含量加和计算得出,具体 CO_3^{2-} 和 HCO_3^{-} 采用双指示剂中和法, Cl^{-} 采用 AgNO_3 滴定法, SO_4^{2-} 采用间接滴定法, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用EDTA络合滴定法, Na^{+} 和 K^{+} 采用火焰光度计法;电导率采用电导法测定。

1.3 数据处理

实验所得数据经Excel 2 007整理,利用SPSS 19.0软件进行统计学分析,结合单因素方差分析中的LSD方法开展不同土壤类型C、N、P化学计量特征的差异显著性多重比较,差异显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

本研究将土壤C、N、P化学计量特征作为研究对象,以土壤含水量、容重、pH、全盐和电导率作为环境因子。利用CANOCO 4.5软件分析土壤C、N、P化学计量特征与环境因子相关关系。运用除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)估计排序轴梯度长度(Lengths of gradient, LGA)。理论上,LGA <3 适合线性排序法,LGA >4 适合非线性排序法,介于3与4之间时,二者均适合。通过对土壤C、N、P化学计量特征进行DCA分析,结果表明最大的排序轴梯度长度小于3,说明土壤C、N、P化学计量特征对环境梯度的响应是线性的,因此采用线性响应模型RDA研究土壤C、N、P化学计量特征与其他理化因子的关系。该方法是一种多元线性回归扩展的多变量直接梯度分析方法,可分析两个变量集的线性关系,并将土壤C、N、P化学计量特征与环境因子的关系反映在同一坐标轴上,从而直观揭示土壤C、N、P化学计量特征对其他理化因子的变异性响应。对以上5个环境因子变量分别进行RDA分析筛选,结果表明,电导率、全盐的变异膨胀因子大于20,意味着二者间具有高的多重共线性,对模型的贡献重复;去除电导率,对土壤含水量、容重、pH和全盐4个指标重新做RDA分析,结果变异膨胀因子均小于20,因此选取土壤含水量、容重、pH和全盐4个指标作为环境因子变量来进行分析,并通过蒙特卡洛(Monte-Carlo)检验定量评价4个其他理化因子对土壤C、N、P化学计量特征的独立解释量。

2 结 果

2.1 土壤C、N、P化学计量特征的描述性统计特征

土壤 C、N、P元素是植物生长发育必需的营养元素，在生物过程中发挥着重要作用。研究区土壤C、N、P元素含量均值分别为2.97、0.27、0.64

mg g⁻¹；土壤C：N、N：P和C：P分别为12.14、0.40、4.55；土壤C：N：P为11.00：1.00：2.37。变异系数（CV）是描述变量空间变异程度的主要指标，土壤C、P元素含量及C、N、P化学计量比变异系数均在0.1~1.0之间，属于中等程度变异；N元素含量变异系数大于1，变异程度强（表1）。

表1 土壤C、N、P化学计量特征的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical parameters of soil C, N and P stoichiometric characteristics

变量指标 Indicator	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurosis	变异系数 CV
C (mg g ⁻¹)	0.45	8.21	2.97	2.62	1.04	-0.45	0.88
N (mg g ⁻¹)	0.04	0.85	0.27	0.27	1.35	0.41	1.02
P (mg g ⁻¹)	0.20	1.65	0.64	0.37	0.95	1.31	0.57
C : N	8.44	13.77	12.14	1.72	-1.20	0.10	0.14
N : P	0.09	1.26	0.40	0.30	1.39	2.08	0.75
C : P	1.20	11.48	4.52	2.75	0.81	0.49	0.61

3种元素的线性拟合分析发现，C与N和C与P元素间均存在着极显著相关关系（ $p < 0.01$ ），N与P元素存在着显著相关关系（ $p < 0.05$ ）。其中，C和N元素之间呈现良好的线性拟合关系，其 R^2 为0.9206，二者几乎同步变化；N和P（ R^2 值为0.2533）、C和P（ R^2 值为0.3361）之间的线性拟合程度相对较低（图1）。

2.2 不同土壤类型C、N、P化学计量特征的差异性

C、N、P元素含量在不同土壤类型间表现出相同的变化趋势，均为灌漠土>盐土>棕漠土>风沙土；其在不同土壤类型间的差异性表现为：灌漠土与棕漠土、盐土和风沙土的C、N元素含量均存在显著性差异（ $p < 0.05$ ），C元素含量在棕漠土和盐土与风沙土间也存在显著性差异（ $p < 0.05$ ），而N元素含量差异不显著；P元素含量在不同土壤类型间的差异性表现为在灌漠土和盐土与风沙土间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ），在其他土壤类型间无显著性差异（ $p > 0.05$ ）（表2）。

进一步分析C、N、P化学计量比在四种土壤类型中的差异性可知，C：N、N：P、C：P在不同土壤类型间的变化趋势分别为盐土>风沙土>棕漠土>灌漠土，灌漠土>棕漠土>盐土>风沙土，灌漠土>棕漠土>盐土>风沙土。它们在不同土壤类型间表现出不同程度的差异性，C：N在不同土壤类

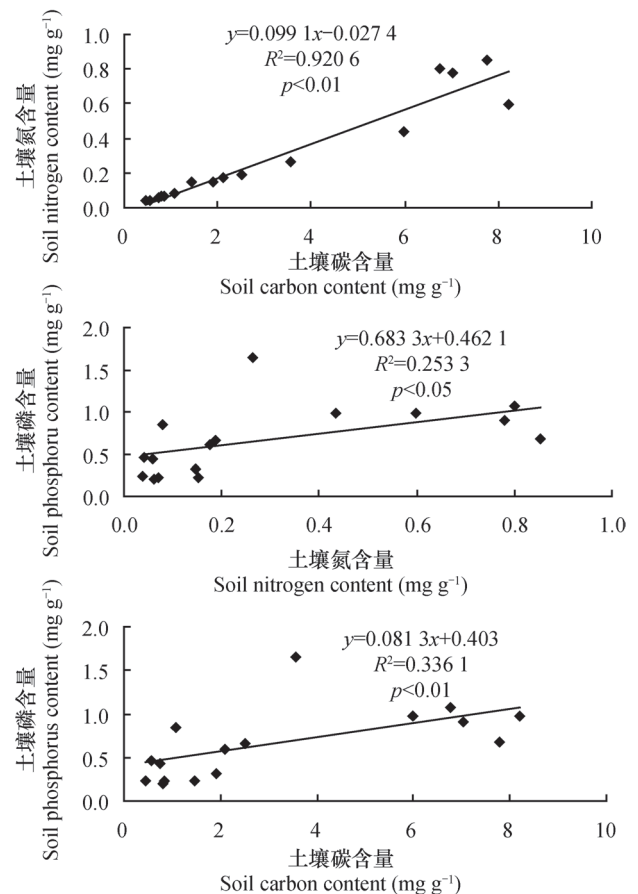


图1 土壤C、N、P元素间的相关性

Fig. 1 Relationships between soil C, N and P in the soils

型间的差异性表现为在灌漠土与盐土间存在显著性差异 ($p < 0.05$), N : P、C : P在不同土壤类型间

表现出相同差异性为在灌漠土与棕漠土、盐土和风沙土间存在显著性差异 ($p < 0.05$) (表2)。

表2 不同土壤类型C、N、P化学计量特征的多重比较

Table 2 Multiple comparisons between the different types of soils in stoichiometric characteristics of soil C, N and P

变量指标Indicator	灌漠土 Irrigated desert soil	棕漠土 Brown desert soil	盐土 Saline soil	风沙土 Aeolian sandy soil
C (mg g^{-1})	$7.15 \pm 0.87\text{a}$	$1.81 \pm 0.56\text{b}$	$2.24 \pm 0.91\text{b}$	$0.68 \pm 0.17\text{c}$
N (mg g^{-1})	$0.69 \pm 0.17\text{a}$	$0.15 \pm 0.04\text{b}$	$0.17 \pm 0.07\text{b}$	$0.05 \pm 0.01\text{b}$
P (mg g^{-1})	$0.92 \pm 0.15\text{a}$	$0.53 \pm 0.25\text{ab}$	$0.81 \pm 0.50\text{a}$	$0.31 \pm 0.13\text{b}$
C : N	$10.81 \pm 2.69\text{b}$	$12.24 \pm 1.62\text{ab}$	$13.02 \pm 0.67\text{a}$	$12.50 \pm 0.63\text{ab}$
N : P	$0.78 \pm 0.31\text{a}$	$0.36 \pm 0.22\text{b}$	$0.26 \pm 0.14\text{b}$	$0.20 \pm 0.10\text{b}$
C : P	$8.00 \pm 2.17\text{a}$	$4.21 \pm 2.09\text{b}$	$3.37 \pm 1.82\text{b}$	$2.52 \pm 1.28\text{b}$

2.3 土壤C、N、P化学计量特征与其他理化因子的相关性

土壤理化因子间相互作用,共同影响着土壤C、N、P化学计量特征。本研究运用数量生态学中的冗余技术分析土壤C、N、P化学计量特征与其他理化因子的相关关系。

对土壤C、N、P化学计量特征和经过变异膨胀因子筛选后的4个理化因子进行RDA,首先获得这

4个理化因子对土壤C、N、P化学计量特征的解释(表3)。土壤C、N、P化学计量特征在第I轴、第II轴的解释量分别为71.7%和5%,累计解释土壤C、N、P化学计量特征信息量为77.2%,对土壤C、N、P化学计量特征和影响因子关系的累计解释量已高达98.1%,由此可知前两轴能够很好地反映土壤C、N、P化学计量特征与理化环境因子的关系,且主要是由第I轴决定。

表3 土壤C、N、P化学计量特征的变化解释变量冗余分析

Table 3 RDA of stoichiometric characteristics of soil C, N and P

排序轴 Axis	第I轴 Axis I	第II轴 Axis II	第III轴 Axis III	第IV轴 Axis IV
化学计量特征解释量 Explained variation of stoichiometric characteristics (%)	71.7	5	1.4	0.1
化学计量特征与理化因子相关性 Correlations between stoichiometric characteristics and physicochemical factors (%)	0.939	0.563	0.75	0.596
化学计量特征累计解释量 Cumulative explained variation of stoichiometric characteristics (%)	71.7	76.7	78.1	78.2
化学计量特征—理化因子关系累计解释量 Cumulative explained variation of relations between stoichiometric characteristics and physicochemical factors (%)	91.7	98.1	99.9	100
典范特征值 Canonical eigenvalues		0.782		
总特征值 Sum of all eigenvalues		1		

环境因子与每个排序轴的相关系数见表4。4个理化因子中，土壤含水量与第 I 轴相关系数最大，达0.87，其次为容重，说明第 I 轴反映了以土壤含水量和容重为主的影响；第 II 轴主要反映了全盐、

pH的影响，第 III 轴主要反映了pH的影响；第 IV 轴反映了以全盐为主的影响，全盐在第 II、IV 轴均有很好的反映。

进一步得到土壤C、N、P化学计量特征指标和

表4 理化因子与排序轴的相关关系

Table 4 Correlation of physicochemical factors with the axes

理化因子 Physicochemical factors	第 I 轴 Axis I	第 II 轴 Axis II	第 III 轴 Axis III	第 IV 轴 Axis IV
土壤含水量 Soil moisture	0.87	0.07	0.23	0.10
容重 Bulk density	-0.81	0.12	0.01	0.27
pH	-0.07	0.26	-0.66	0.02
全盐 Total salt	-0.30	0.26	-0.33	-0.42

理化因子二维排序图（图2）。在排序图中，箭头连线与排序轴的夹角表示与排序轴的相关性大小，夹角越小，相关性越大。土壤C、N、P化学计量特征指标用实线表示，理化因子用虚线表示；箭头连线的长短表示土壤C、N、P化学计量特征与理化因子关系的大小，箭头连线越长相关性越大，反之，则越小；两个箭头连线的夹角可以看作是土壤C、N、P化学计量特征指标和影响因子相关性大

小；当夹角角度在 0°~90°时，两个变量之间呈正相关；当夹角角度在90°~180°时，二者之间呈负相关；当夹角角度为90°时，表示二者没有相关关系。从图2中可以看出，土壤水分和容重的箭头连线最长，可知土壤水分和容重对土壤C、N、P化学计量特征变异起到很好的解释：土壤水分与C : N 值成反比，与土壤C、N、P化学计量其他特征成正比，其中与C元素含量相关性最大；容重、pH和全盐与C : N值成正比，与土壤C、N、P化学计量其他特征成反比。

综合上述研究，可以看出理化环境因子对土壤C、N、P化学计量特征的影响存在差异。对4个理化环境因子进行Monte-Carlo检验，得到理化环境变量的重要性排序，结果如表5所示。理化因子对土壤C、N、P化学计量特征影响的重要性由大到小依次为土壤含水量、容重、全盐、pH，其中土壤含水量对土壤C、N、P化学计量特征影响极显著 ($p = 0.002 < 0.01$)，容重对土壤C、N、P化学计量特征影响显著 ($p = 0.014 < 0.05$)，土壤含水量和容重解释量占有所有环境因子解释量的比例分别为62%和54%，说明土壤含水量和容重是影响土壤C、N、P化学计量特征的主要环境因子；pH和全盐对土壤C、N、P化学计量特征的影响未达到显著水平。

对土壤含水量、容重、pH和全盐这4个环境因

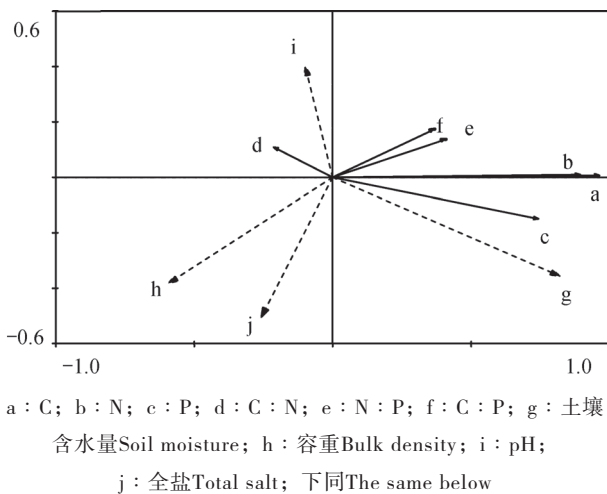


图2 土壤C、N、P化学计量特征与理化因子关系的冗余分析二维排序图

Fig. 2 Bidimensional ordering chart of the RDA of relationships of stoichiometric characteristics of soil C, N and P with physicochemical factors

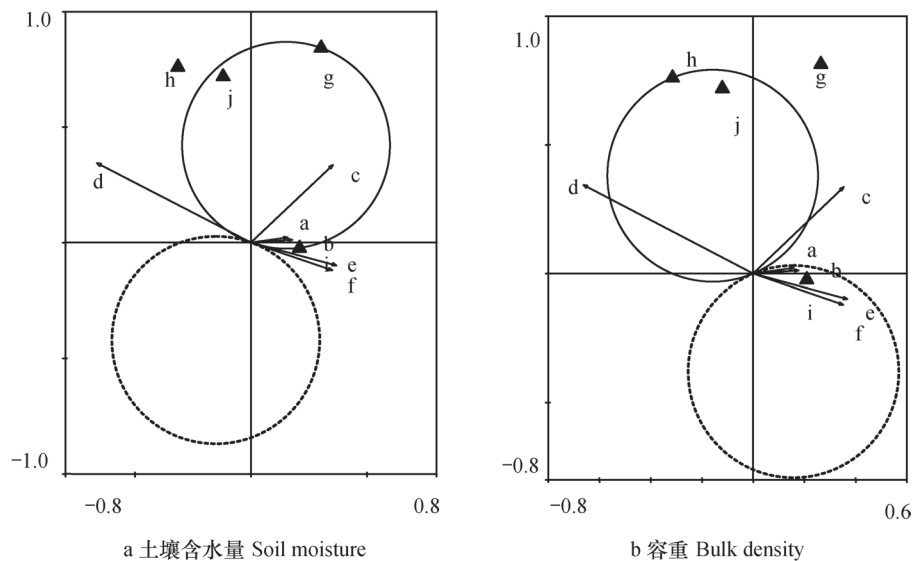
表5 理化环境变量解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 5 Importance sequencing and Duncan test of physicochemical factors

理化因子 Physicochemical factors	重要性排序 Importance sequencing	理化因子所占解释量 Explained variation of various physicochemical factors (%)		<i>F</i>	<i>p</i>
土壤含水量 Soil moisture	1	62	29.58	0.002	
容重 Bulk density	2	54	4.35	0.014	
全盐 Total salt	3	9	2.8	0.08	
pH	4	3	2.62	0.1	

子进行*t*检验,明确各指标与土壤C、N、P化学计量特征的关系。从图3a可以看出,土壤C、N、P元素含量箭头完全落入土壤含水量实线圈内,表明土壤C、N、P元素含量与土壤含水量呈显著正相关关系,即随着土壤含水量的增加土壤C、N、P元素含量将明显增加;土壤C、N、P化学计量比箭头未落入土壤含水量的实虚线圈内,说明其与土壤含水量

有一定程度的正负相关性,但相关性不显著。容重作为单一因子对土壤C、N、P化学计量特征的影响如图3b所示,其中土壤C、N、N:P、C:P指标完全落入容重虚线圈内,即随着容重的减少土壤C、N、N:P、C:P比值将明显增加;土壤C、N、P化学计量特征对pH和全盐的变化响应未达到显著水平。



注:实线圈为正相关,虚线圈为负相关Note: Close circle: positive correlation; Dashed circle: negative correlation

图3 单一关键理化因子对土壤C、N、P化学计量特征的检验结果

Fig. 3 T-test of stoichiometric characteristics of soil C, N and P with single crucial physicochemical factors

3 讨论

3.1 土壤C、N、P化学计量特征

土壤C、N、P化学计量特征不仅能够反映土壤系统功能的变异性,而且元素间的计量比是土壤有

机质构成、土壤质量状况以及养分供给能力的一个重要表现指标^[21]。研究区土壤贫瘠,土壤C、N、P元素含量远低于全国平均水平^[22]。灌漠土因动植物残体的分解及农耕施肥的不断补充,其土壤元素含量相对较高;风沙土距水源较远,植被覆盖

度低，在四种土壤类型中最为贫瘠，元素含量也相对较低；棕漠土和盐土介于二者之间。C、N、P元素相关性研究结果表明，C与N元素含量间存在很好的线性拟合关系，土壤全氮90%存在于土壤有机质中^[23]，二者常有较为一致的分布趋势，这与周红^[24]和王维奇^[22]等对湿地土壤元素间关系的研究结果相一致；P元素含量的变化滞后于C、N元素含量，这可能是由于土壤P元素主要来自凋落物的归还及岩石风化^[25]，研究区凋落物较少且岩石风化过程漫长，相对于C、N元素来说，各土壤类型P元素的累积缓慢。在不同土壤类型间C:N较N:P、C:P稳定，这与C、N元素含量对同一环境因素变化的响应几乎同步有关。Zhang等^[26]对三江平原小叶章和毛果苔草两种植被类型下湿地土壤C、N、P化学计量特征的研究结果和Bui等^[27]研究澳大利亚土壤C:N:P化学计量特征得出N:P、C:P变化范围较C:N大的结果与上述结论相同。不同土壤类型的化学计量特征也存在不同程度的差异性。C:N是土壤质量的敏感指标，较低的C:N对土壤微生物活动能力有一定的促进作用，灌漠土随农耕施氮的增加，使有机质和有机氮的分解矿化速度加快^[28]，引起C:N低。N:P是土壤养分限制类型的有效预测指标，研究区除灌漠土外N元素极为匮乏，其中风沙土最为贫瘠；C:P是磷可获得性高低的表征参数，灌漠土磷可获得性显著高于棕漠土、盐土和风沙土。与全球土壤的平均水平（C:N:P=186:13:1）^[29]相比，该区不同土壤类型的C:N:P（11:1:2.37）较低，降低了土壤养分可利用性。有学者分析土壤养分可利用性得出，除了N:P，表层土壤C:N也能够很好地指示土壤供N状况^[30]；综合土壤C、N、P计量比的研究结果可知，研究区土壤C:N小于30、N:P比小于14^[31]，即N元素决定了研究区土壤中C、N、P化学计量特征的变化过程。

3.2 土壤C、N、P化学计量特征与其他理化因子的关系

土壤是植物吸收各种养分的载体和媒介，也是发生一系列生理生化反应的重要场所，土壤本身各种理化性质的改变对元素循环产生重大影响。研究区土壤含水量是影响土壤C、N、P化学计量特征最主要的驱动因子，其中土壤含水量与土壤C、N元素含量和N:P、C:P呈现极显著正相关关系，即随着土壤含水量的减少，土壤C、N元素含量及

N:P、C:P计量比均有不同程度的减少。土壤水分是土壤系统元素运移及循环的载体，它直接影响土壤的特性和植物的生长。肖焯等^[32]研究发现土壤含水量是影响山地沼泽湿地土壤C:P和N:P比的关键因子。丁小慧等^[33]对影响呼伦贝尔草地土壤C、N、P元素含量的理化因子研究结果表明，土壤含水量与土壤有机碳、土壤全磷呈极显著正相关关系，与土壤全N呈显著正相关关系。以上研究结果均表明，土壤含水量对土壤C、N、P化学计量特征起着最重要的作用。土壤容重与土壤C、N元素含量和N:P、C:P呈现极显著负相关关系，随土壤容重的增加，土壤C、N元素含量和N:P、C:P值均有不同程度的减少。土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标，影响着植物根系生长和凋落物分解，进而影响元素在土壤生态过程的运移和积累。土壤容重小则土壤疏松，有利于拦渗蓄水^[34]以及元素在土壤中累积；土壤容重大则土壤紧实，不宜于植物根系生长且减少凋落物分解，从而影响植物与土壤间的元素交流。这与王维奇等^[35]对闽江河口芦苇湿地土壤C、N、P化学计量比与影响因子关系的研究结果相似。pH和全盐对土壤C、N、P化学计量特征的影响均未达到显著水平。有关盐分如何影响土壤C、N、P化学计量特征的研究较少，刘兴华^[21]对其的研究结果表明，盐度和pH是影响湿地土壤C:N、C:P和N:P比的关键因子。这与本研究结论不同，研究区本身的盐碱程度较高，盐分的空间异质性小，土壤盐碱性差异不大，盐分不作为影响土壤C、N、P化学计量特征的最主要因素。

生态化学计量学是结合热力学第一定律、生物进化的自然选择原理和分子生物学中心法则的一种理论、一种思维和一种工具，应向生态学的各个领域渗透发展。本研究结合冗余分析技术从土壤含水量、容重以及盐分等多角度系统研究了绿洲土壤C、N、P化学计量特征及其与其他理化因子的关系，这是对土壤化学计量学在干旱区土壤生态系统研究中的有益尝试，也是将排序方法应用于土壤元素与其他理化因子关系研究的实现。进一步结合植被C、N、P化学计量特征研究绿洲生态系统内稳性是下一步工作的方向。

4 结论

研究区土壤C、N、P含量整体水平不高，

C含量的变异系数(0.88)和N含量的变异系数(1.02)较高; C:N在不同土壤类型间的变异性较C、N更为稳定(变异系数为0.14); C:P变化范围(1.20~11.48)较大。土壤含水量和容重是影响土壤C、N、P化学计量特征的主要因素, pH和全盐是次要影响因素。其中, 土壤含水量与土壤C、N元素含量和N:P、C:P呈现极显著正相关关系, 土壤容重与土壤C、N元素含量和N:P、C:P呈现极显著负相关关系, 而pH和全盐对土壤C、N、P化学计量特征的影响未达到显著性水平。土壤C、N、P计量比表明N是研究区主要的限制因素, 且影响研究区土壤C、N、P化学计量特征分布规律的环境因子主要是土壤含水量和容重, 而非盐度。

参考文献

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3 (6): 540—550
- [2] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 2010, 20 (1): 5—15
- [3] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29 (6): 1007—1019. Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29 (6): 1007—1019
- [4] 王振兴. 国内生态化学计量学研究进展. *绿色科技*, 2011 (7): 195—196. Wang Z X. Research advances and prospect of ecological stoichiometry in China (In Chinese). *Journal of Green Science and Technology*, 2011 (7): 195—196
- [5] 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. *生态学报*, 2013, 33 (15): 4674—4682. Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (15): 4674—4682
- [6] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101 (30): 11001—11006
- [7] Sabine G, Jos T A V. Litter N:P ratios indicate whether N or P limit the decomposability of graminoid leaf litter. *Plant and Soil*, 2006, 287 (1): 131—143
- [8] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 2010, 186 (3): 593—608
- [9] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征. *植物生态学报*, 2011, 35 (6): 587—595. Wang J Y, Wang S Q, Li R L, et al. C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35 (6): 587—595
- [10] Bryan S G, Annette S, Michael B. C:N:P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess. *Ecological Processes*, 2012, 1 (1): 1—11
- [11] Bai Y F, Wu J G, Chris M C, et al. Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49 (6): 1204—1215
- [12] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物C:N:P生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31 (2): 335—343. Pan F J, Zhang W, Wang K L, et al. Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (2): 335—343
- [13] Carl C H, Lisa H, Joachim A, et al. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 75—87
- [14] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征. *生态学杂志*, 2012, 31 (2): 254—260. Luo Y Y, Zhang Y, Zhang J H, et al. Soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degradation stages (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31 (2): 254—260
- [15] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, et al. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: Influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology and seawalls. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13 (6): 1043—1051
- [16] Gao Y, He N P, Yu G R, et al. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in

- China. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 171—181
- [17] 周小虎, 王政伟, 万余庆. 塔里木河上游地区土壤盐渍化信息提取研究. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2008, 39 (4) : 572—576. Zhou X H, Wang Z W, Wan Y Q. The information extraction study of soil salinization in Upper Tarim river (In Chinese). *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2008, 39 (4) : 572—576
- [18] 贡璐, 冉启洋, 张雪妮, 等. 塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征及其影响因子分析. *环境科学研究*, 2013, 26 (6) : 631—636. Gong L, Ran Q Y, Zhang X N, et al. Characteristics of surface soil salinity and impact factor analysis for the oasis in the upper reach of the Tarim River (In Chinese). *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26 (6) : 631—636
- [19] 王家强, 柳维扬, 彭杰, 等. 塔里木河上游荒漠河岸林土壤速效氮空间变异性研究. *中国农学通报*, 2014, 30 (1) : 52—57. Wang J Q, Liu W Y, Peng J, et al. Study on soil available nitrogen spatial variation of desert riparian forest in the Tarim River upstream (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30 (1) : 52—57
- [20] 闫冰, 周智彬, 刘凤山, 等. 咸淡轮灌条件下塔里木河上游绿洲土壤入渗特性. *水土保持学报*, 2012, 26 (6) : 238—242. Yan B, Zhou Z B, Liu F S, et al. Infiltration properties of soil in the oasis of upper Tarim River under alternative irrigation of fresh and saline water (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (6) : 238—242
- [21] 刘兴华. 黄河三角洲湿地植物与土壤C、N、P生态化学计量特征研究. 山东泰安: 山东农业大学, 2013. Liu X H. C, N, P stoichiometry of plants and soil in the wetland of Yellow River Delta (In Chinese). Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2013
- [22] 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. *环境科学*, 2010, 31 (10) : 2411—2416. Wang W Q, Zeng C S, Zhong C Q, et al. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in Min-jiang River Estuarine Wetland (In Chinese). *Environmental Science*, 2010, 31 (10) : 2411—2416
- [23] 龙健, 廖洪凯, 李娟, 等. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究. *环境科学*, 2012, 33 (6) : 2131—2138. Long J, Liao H K, Li J, et al. Relationships between soil and rocky desertification in typical karst mountain area based on redundancy analysis (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33 (6) : 2131—2138
- [24] 周红. 辽河口湿地表层土壤生源要素计量学分析. *北方环境*, 2012, 24 (4) : 34—38. Zhou H. Metrology analysis of biogenic elements in the soil from wetland based on the vegetation differences (In Chinese). *Northern Environmental*, 2012, 24 (4) : 34—38
- [25] Paul B H, Ingrid C B, William K L. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe. *Plant and Soil*, 1991, 138 (2) : 247—256
- [26] Zhang Z S, Lu X G, Song X L, et al. Soil C, N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12 (9) : 1309—1315
- [27] Bui E N, Henderson B L. C: N: P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373 (1/2) : 553—568
- [28] Soh S, Makoto S, Antonie D M Z, et al. Effect of vegetation on soil C, N, P and other minerals in Oxisols at the forest-savanna transition zone of central Africa. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60 (1) : 45—59
- [29] Cory C C, Daniel L. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 2007, 85 (3) : 235—252
- [30] 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. *Biogeochemistry*, 2010, 98 (1) : 139—151
- [31] 谭秋锦, 宋同清, 曾馥平, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤养分及其生态化学计量特征. *农业现代化研究*, 2014, 35 (2) : 225—228. Tan Q J, Song T Q, Zeng F P, et al. Soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics under different ecosystems in Karst Canyon Region (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35 (2) : 225—228
- [32] 肖焯, 商丽娜, 黄志刚, 等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. *地理科学*, 2014, 34 (8) : 994—1001. Xiao Y, Shang L N, Huang Z G, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of Eastern Jilin Province (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34 (8) : 994—1001
- [33] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化. *生态学报*, 2012, 32 (11) : 3467—3476. Ding X H, Luo S Z, Liu J W, et al. Longitude gradient changes on plant

- community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (11) : 3467—3476
- [34] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价. *生态学报*, 2011, 31 (14) : 4136—4143. Gong L, Zhang H F, Lü G H, et al. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (14) : 4136—4143
- [35] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2012, 32 (13) : 4087—4093. Wang W Q, Wang C, Zeng C S, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (13) : 4087—4093

STOICHIOMETRIC CHARACTERISTICS OF SOIL IN AN OASIS ON NORTHERN EDGE OF TARIM BASIN, CHINA

Li Honglin^{1, 2} Gong Lu^{1, 2†} Zhu Meiling^{1, 2} Liu Zengyuan^{1, 2} Xie Lina^{1, 2} Hong Yi^{1, 2}

(1 College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

(2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract Carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) are the three most important basic elements in soils of arid regions because biogeochemical circulations are closely related to ecological structures, processes and functions of the soils. Ecological stoichiometry combining the first law of thermodynamics, the theory of natural selection during biological evolutions, and the central dogma of molecular biology, has organically integrated biological studies of different scales in the fields of molecules, cells, species groups, communities and ecosystems. As soil is an important component of the terrestrial ecosystem, its elements stoichiometry characteristics plays a substantial role in terrestrial cycling of carbon and nutrients. Four types of soils, i.e. irrigated desert soil, brown desert soil, saline soil and aeolian sandy soil, in the Alar Reclamation Zone at the north edge of the Tarim Basin were selected as objects of the study to explore stoichiometry characteristics soil C, N and P, and to analyze in-depth their relationships with other physical and chemical factors using the redundancy analysis (RDA) technique of the sorting method. Results show that the mean content of soil C, N and P was 2.97, 0.27 and 0.64 mg g⁻¹, respectively; and soil C : N, N : P and C : P ratio was 12.14, 0.40 and 4.55, respectively. Soil C and P varied moderately and soil N quite sharply in stoichiometrical characteristics in all the four soils. Correlation analysis of the elements shows that extremely significant correlations exist between C and N, and between C and P ($p < 0.01$), and between N and P ($p < 0.05$). And C and N were almost synchronous in variation, while P always lagged behind the two. Compared with the average of the global soil (C : N : P=186 : 13 : 1), the soils in this area, regardless of type of soil, were lower in C : N : P ratio (11 : 1 : 2.37), thus leading to lower soil nutrient availability. In terms of C, N and P contents, the four soils followed an order of irrigated desert soil > Saline soil > brown desert soil > aeolian sandy soil. Stoichiometrical ratios of the three elements varied somewhat with the type of soil. C : N was more stable than N : P and C : P. In terms of C : N, the four soils followed an order of saline soil > aeolian sandy soil > brown desert soil > irrigated desert soil, and in terms of N : P and C : P, they did an order of irrigated desert soil > brown desert soil > saline soil > aeolian sandy soil. RDA shows that soil water content is the major factor affecting stoichiometrical properties of soil C, N and P in the study area and soil bulk density followed. However, pH and total salt did not have much significant impact. Soil moisture

content was significantly and positively related to C, N and P contents, and also positively to N : P and C : P, but negatively to C : N. Soil bulk density was significantly and negatively related to C, N, N : P and C : P, but positively to P content and C : N. Soil N : P and surface soil C : N are two factors that can be used jointly as a good indicator of soil N supply. Overall consideration of soil C : N and N : P in the region reveals that soil C : N is < 30 and N : P < 14 , which determines variation of stoichiometrical characteristics of C, N and P in the soils of the study area.

Key words Oasis soil; Soil stoichiometry; Soil nutrients; Tarim basin

(责任编辑：卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system..... Zhao Yanfeng, Cheng Daoquan, Chen Jie, et al. (1207)
- Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)

Research Articles

- Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. (1235)
- Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties typical of Central and East China Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
- Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
- Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta Li Ping, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. (1271)
- Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1278)
- Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
- Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
- Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
- Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
- Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978–2008 Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
- Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China Yang Wen, Zhou Jiaogen, Wang Meihui, et al. (1343)
- Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
- Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
- Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
- Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on *Eisenia fetida* Ma Jingjing, Qian Xinchun, Zhang Wei, et al. (1381)
- Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
- Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonetz Zhang Tibin, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. (1399)
- Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Ma Zhonghua, et al. (1410)
- Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive waste disposal Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)

Research Notes

- Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data Song Jinhong, Wu Jinggui, Zhao Xinyu, et al. (1429)
- Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
- Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)

Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

