

塔里木盆地北缘绿洲不同土地利用方式土壤有机碳、 无机碳变化及其土壤影响因子

贡璐 罗艳 解丽娜

(新疆大学 资源与环境科学学院/绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046)

摘要 以塔里木盆地北缘典型绿洲阿拉尔垦区为靶区,结合经典统计学和冗余分析技术,研究绿洲7种土地利用类型土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化因子的分异规律及其相关性。统计分析显示,研究区不同土地利用类型土壤有机碳、无机碳含量在各土层具有不同的分布格局,相同土层不同类型间的分布存在一定差异。0~20、20~50和50~80 cm土层有机碳含量均值分别为6.97、2.95和2.45 g/kg,无机碳含量为4.83、5.25和3.48 g/kg;在0~20 cm土层中,有机碳含量以天然林最高、沙地最低,无机碳表现为棉田、盐碱地、荒草地、沙地含量显著高于其他3种类型;20~50 cm土层中,有机碳含量最高值出现在天然林、人工林中,且显著高于荒草地和沙地,无机碳分布与0~20 cm土层保持一致;50~80 cm土层中,果园、棉田有机碳含量显著高于沙地,各类型无机碳含量差异不显著。冗余分析结果表明:土壤有机碳含量与全氮、土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与容重极显著负相关($P<0.01$),无机碳含量与全盐呈极显著正相关($P<0.01$),与全氮、土壤含水量、速效钾呈极显著负相关($P<0.01$),pH、有效磷则与土壤有机碳和无机碳含量的相关性均未达显著水平($P>0.05$);各理化因子对土壤有机碳、无机碳含量影响的重要性排序为:全氮>容重>土壤含水量>有效磷>速效钾>全盐>pH。

关键词 土壤有机碳; 土壤无机碳; 不同土地利用类型; 冗余分析; 塔里木盆地北缘-

中图分类号 S153.6; Q148

文章编号 1007-4333(2017)12-0083-12

文献标志码 A

Changes in SOC and SIC concentration with land uses and their soil influencing factors in northern marginal zones of Tarim Basin

GONG Lu, LUO Yan, XIE Lina

(College of Resources and Environmental Science/Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract Organic/inorganic carbon contents and physical-chemical factors in oasis soil, and the correlations between them were analyzed by traditional statistics and redundancy analysis in the northern marginal zones of Tarim Basin. The results showed that the soil organic and inorganic carbon content in different land use types of soil had different distribution pattern. In 0–20, 20–50 and 50–80 cm soil layers the average of soil carbon properties (soil organic and soil inorganic carbon) were 6.97, 2.95, 2.45 g/kg and 4.83, 5.25, 3.48 g/kg, respectively. In 0–20 cm soil layer, the content of soil organic carbon was highest under natural forest, lowest under sand, the soil inorganic carbon under cotton fields, saline-alkali land, weeds land were similar and much higher than other three types; In 20–50 cm soil layer, the content of organic carbon under natural forests and plantation were reached highest and significantly higher than weeds and sand, the distribution of the inorganic carbon was in line with 0–20 cm soil layer; In 50–80 cm soil layer, the content of organic carbon under orchard and cotton fields is significantly higher than sand, the content of inorganic carbon under different types was not significant in this soil layer. According to the RDA results, the total nitrogen, soil moisture and total salt were significantly positive correlated with soil organic carbon content ($P<0.01$), and bulk density was significant negative correlated with it ($P<0.01$). The total salt was significantly positive correlated with soil inorganic

收稿日期: 2016-12-19

基金项目: 自治区青年科技创新人才培养工程(qn2015yx002); 国家自然科学基金项目(41461105)

第一作者: 贡璐, 教授, 博士, 主要从事干旱区资源与环境研究, E-mail: gonglu721@163.com

carbon content ($P < 0.01$), and the total nitrogen, soil moisture, available potassium were significantly negative correlated with soil inorganic carbon content ($P < 0.01$). There was no significant correlations between pH/available P and the content of soil carbon ($P > 0.05$); The importance of environmental factors to soil carbon content in descending order was nitrogen > bulk density > soil moisture > available P > available K > total salt > pH.

Keywords soil organic carbon; soil inorganic carbon; different land use types; redundancy analysis; the northern marginal zones of Tarim Basin

土壤碳库是地球表层系统中最大的碳储库,包括土壤有机碳和无机碳。土壤有机碳是土壤碳库中较为活跃的部分,无机碳相比有机碳较为稳定,二者受区域土地利用方式和理化环境影响表现出不同的分异规律,在全球碳循环平衡过程中起着重要作用^[1]。当前国内外学者对土壤碳库特征及其影响因素开展了广泛研究,研究主要针对湿润、半湿润地区森林、草地、湿地和农田等不同生态系统的土壤有机碳^[2-6],对干旱、半干旱地区土壤碳库尤其是土壤无机碳关注相对较少^[7-8],同步开展土壤有机碳与无机碳含量特征及其影响因素的综合性报道更是较为匮乏^[9]。干旱生态系统占陆地总面积的47%,约占全球“碳失汇”的1/3^[10],在全球碳循环过程中占有十分重要的地位。作为干旱区碳素的主要存储场所,绿洲土壤碳库联系着生态系统内部及外部物质循环,是全球碳平衡及土壤养分的科学管理等生态环境问题研究的重要内容,特别是干旱区大量无机碳的存在对寻找全球“碳汇”意义重大。土壤无机碳更新缓慢,但其积累速率高且储量巨大,在干旱区碳循环过程中的贡献日益显著,使得干旱区土壤碳循环研究需同时兼顾土壤有机碳和无机碳^[11]。系统研究该区土壤碳库特征及其与驱动因子的互动关系,对于揭示干旱区碳库平衡转化机制、探求调控区域碳的关键因子有着重要的科学意义。

阿拉尔垦区位于西部干旱区塔里木盆地北缘,气候干旱,降水稀少,土壤盐渍化、沙化等问题严重。当前,高强度的土地开发利用改变了原有的土壤理化环境,破坏了该区土壤碳库平衡。目前,关于该区域的土壤碳库研究仅涉及荒漠植被的土壤碳特征^[12-13]。本研究以塔里木盆地北缘绿洲阿拉尔垦区为研究对象,在系统分析不同土地利用类型土壤有机、无机碳及理化因子分异规律的基础上,采用冗余分析研究了土壤有机、无机碳含量与理化因子间的相关性,有助于深入理解土壤碳与环境因子间的作用机制,旨在为研究全球碳循环机制与收支平衡提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

阿拉尔垦区地处新疆天山中段南麓,塔里木河上游、塔克拉玛干沙漠北缘。地跨 $40^{\circ}22' \sim 40^{\circ}57'N$, $80^{\circ}30' \sim 81^{\circ}58'E$,东邻沙雅县,西依阿瓦提县,南、北靠阿克苏市,东北接新和县。东西宽约281 km,南北长180 km,平均海拔1100 m,地势由西北向东南倾斜。该地区气候类型属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,雨量稀少,地表蒸发强烈,年均温度为 $11.6^{\circ}C$,年均降水量为40.1~82.5 mm,年均蒸发量为1876.6~2558.9 mm。由于临近沙漠,春季浮尘、沙尘暴等灾害性天气较常见。土壤母质以棕漠土为主。天然林、果园、人工林、棉田、盐碱地、荒草地和沙地是该区的主要土地利用类型。

1.2 野外采样

野外土样采集于2014年7月进行,采样点集中阿拉尔垦区农一师十二团。共采集7种土地利用类型的土壤样品:天然林(棕漠土;植被多以胡杨林为主,分布于河岸两旁;受轻度人为干扰);1)果园(灌漠土;主要种植类型为枣树;受重度人为干扰);2)棉田(灌漠土;受重度人为干扰);3)人工林(灌漠土;植被以胡杨为主,大多分布于农田周边及道路两旁;受中度人为干扰);4)盐碱地(盐渍土;植被以盐生植物为主,常见有盐穗木、盐爪爪,分布于农田外围;受人为干扰较轻);5)荒草地(棕漠土;主要植被类型为怪柳、骆驼刺、芦苇等,分布于绿洲与荒漠交错带;受轻度人为干扰);6)沙地(风沙土;植被盖度小于5%,分布于绿洲边缘;基本不受人为干扰);7)每种土地利用类型分别选取5个典型样方(样方面积设置为棉田、荒草地、盐碱地和沙地 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,果园和林地 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$)。各样方按S型布设5个样点后采集0~20、20~50和50~80 cm土样,去除土样中植物根系和石块,将每层土样充分混匀并用四分法取500 g。野外采集的土样带回实验室后立即进行风干,待土样完全干燥后将土壤过80目(0.178 mm)筛,随后放

入密封袋中保存。

1.3 实验室分析

有机碳含量测定采用重铬酸钾稀释热法;无机碳含量测定采用快速滴定法。

研究所选择的土壤理化因子包括全氮、有效磷、速效钾、容重、土壤含水量、pH、电导率、全盐(由 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 八大离子加和),共 8 个指标。具体试验方法^[14]为:全氮采用半微量凯氏法;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法;容重采用环刀法;土壤含水量采用烘干法;pH 采用电位法;电导率采用电导法; 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 EDTA 间接滴定法; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法; Na^+ 和 K^+ 采用火焰光度法。

1.4 数据处理方法

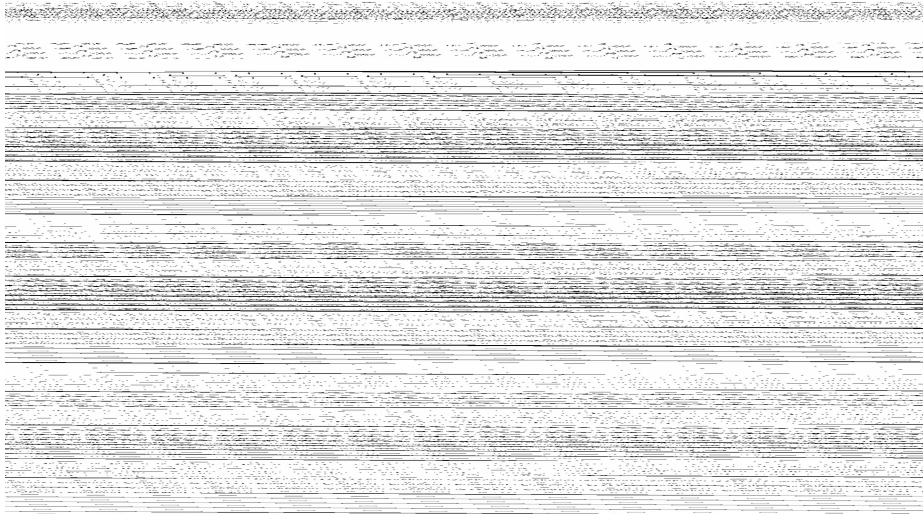
使用 Excel 进行基本统计处理,计算数据平均值($n=5$)、标准差(SD)。利用 SPSS17.0 软件中的方差分析(LSD 方法)检验不同土地利用类型土壤有机碳和无机碳含量差异性($\alpha=0.05$)。进一步通过 Canoco for Windows 4.5 软件的约束性排序法研究土壤有机碳、无机碳与多种理化因子间的相关

性。将土壤有机、无机碳和理化因子分别作为响应变量、解释变量进行分析,首先进行去趋势对应分析(DCA),估计排序轴梯度长度,从而判断排序模型(4 个轴中梯度长度最大值 >4 ,选择单峰模型,即典范对应分析(CCA); <3 ,选择线性模型,即冗余分析(RDA); $3\sim4$,2 种模型均适合)。4 个排序轴中梯度长度最大值 <3 ,因此选择 RDA。对于约束性排序来说,排序轴是参与排序的解释变量的线性组合(多元多重回归),解释变量对响应变量的影响被集中在了几个合成的排序轴上,这种排序轴也叫典范轴。RDA 是约束性排序的一种,作为基于线性模型的多变量直接梯度分析,能够较好的将 2 个变量集间的相关性在同一坐标系内反映。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、无机碳含量特征及差异性分析

阿拉尔垦区 7 种不同土地利用类型土壤有机碳、无机碳含量分布特征如图 1 所示。0~20、20~50 和 50~80 cm 土层有机碳含量均值分别为 6.97、2.95 和 2.45 g/kg,无机碳含量均值为 4.83、5.25 和 3.48 g/kg。天然林、果园、人工林土壤有机碳含量随土层深度的增加而减少,棉田、盐碱地、荒草地



小写字母为土壤有机、无机碳含量在同一土层不同土地利用类型间多重比较;大写字母为有机、无机碳含量在同一土地利用类型不同土层间多重比较。

Lowercase letters are soil organic and inorganic carbon contents are compared between different land use types in the same soil layer. Capital letters are organic and inorganic carbon contents are compared between different soil layers in the same land use type.

I:天然林 Natural forest; II:果园 Orchard; III:棉田 Cotton fields; IV:人工林 Plantation; V:盐碱地 Saline-alkali land; VI:荒地 Weeds land; VII:沙地 Sand 下同。The same below.

图 1 不同土壤剖面土壤有机、无机碳含量分布特征

Fig. 1 Soil SOC and SIC concentration of three soil profiles

和沙地土壤有机碳含量随土层深度的增加没有明显变化。果园、棉田、人工林、盐碱地、荒草地和沙地土壤无机碳含量总体上随土层深度的增加呈先升高后降低的趋势,而天然林呈逐渐升高的趋势。可见,不同土地利用类型的土壤有机碳和无机碳含量在各土层的分布格局不同。

土壤有机碳、无机碳含量在同一土层各土地利用类型间的分布也有一定差异性。0~20 cm 土层有机碳含量天然林最高,达 25.81 g/kg,显著高于其他利用类型;20~50 cm 土层各类型有机碳含量较低均在 5 g/kg 以下,天然林(4.41 g/kg)和人工林(4.74 g/kg)有机碳含量显著高于荒草地(1.88 g/kg)和沙地(0.65 g/kg);50~80 cm 土层棉田有机碳含量高于果园、人工林、天然林、盐碱地、荒草地和沙地,其中棉田、果园有机碳含量显著高于沙地。各类型土壤无机碳含量在 0~20 和 20~50 cm 土层中分布相似,其含量顺序为沙地>荒草地>盐碱地>棉田>人工林>果园>天然林,沙地、荒草地、盐碱地和棉田无机碳含量显著高于天然林;在 50~80 cm 土层内各类型土壤无机碳含量差异不显著。

2.2 土壤理化因子特征及差异性分析

不同土地利用类型土壤理化性质的分异规律如表 1 所示。氮素是植物生长发育所需的大量营养元素之一,7 种土地利用类型土壤全氮含量为 0.06~2.03 g/kg,除沙地外的各土类均以 0~20 cm 土层全氮含量为最高,其大小顺序为天然林>果园>人工林>棉田>盐碱地>荒草地>沙地;20~50 cm 土层全氮含量人工林最高(0.36 g/kg),沙地最低(0.06 g/kg);50~80 cm 土层仅沙地全氮含量显著低于其他类型,其他各类型间无显著性差异。有效磷是土壤磷素供应水平高低的指标,研究区内 7 种类型均以 0~20 cm 土层有效磷含量最高,在 0~20 cm 土层中有效磷含量天然林最高(62.60 g/kg),棉田次之(35.72 g/kg),天然林有效磷含量显著高于除棉田外的其他类型;在 20~50 cm 土层各类型有效磷含量均差异不显著;50~80 cm 土层棉田有效磷含量最高(6.32 g/kg),沙地含量最低(1.47 g/kg)。速效钾在 0~20 和 20~50 cm 土层中天然林含量显著高于其他类型;在 50~80 cm 土层天然林与盐碱地显著高于沙地,其他各类型间差异不显著。不同土层中的土壤含水量均为沙地显著

低于其他类型。土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标,也是表征土壤质量的重要参数,各类型土壤容重在 1.076~1.536 变化。研究区土壤整体偏碱性,pH 为 7.60~8.69。土壤盐渍化程度较高,天然林与盐碱地电导率值和全盐含量较为接近,二者电导率值和全盐含量显著高于其他类型。

2.3 土壤有机、无机碳含量与理化因子相关性分析

2.3.1 土壤有机、无机碳含量与理化因子的 RDA 排序

为了更好地揭示土壤有机、无机碳含量与土壤理化因子的相关性,本研究采用 RDA 方法对 2 个变量组进行分析。RDA 作为主成分分析的约束化形式,能够在剔除协同变量(对响应变量解释较少的变量)基础上,将主要解释变量与响应变量间的相关性直观反映在排序图上。变异膨胀因子反映了解释变量对模型的贡献率,当某个变量的膨胀系数较大时(>20),表明它与其他变量的多重共线性较高,在后续的分析过程中应剔除。对所选的 8 个理化因子进行筛选,电导率具有较高的膨胀系数(22.293),因此选择剩余 7 个指标作为解释变量进行分析。由表 2 可知,在前 2 个排序轴中,响应变量与解释变量的相关系数分别为 0.937、0.356,7 种理化因子对土壤有机、无机碳含量的解释量在前 2 个轴累积达到 79.4%,而前 2 个排序轴 2 组变量的关系累积贡献率为 100%,证明排序效果较好。另外由表 3 数据可知,对 2 组变量数据来说,第 1 和第 2 排序轴之间的相关系数都较小,分别为 0.075 和 0,2 个排序轴几乎垂直,进一步证明了排序结果的可靠性。

图 2 是对土壤有机、无机碳含量与各理化因子相关关系进行 RDA 排序得到的二维排序图。图 2 中,箭头长短及方向表示相关性大小,箭头越长,表示相关性越大,箭头夹角间的余弦值越大,相关性越高。全氮(a)、有效磷(b)、土壤含水量(e)与土壤有机碳(A)、无机碳含量(B)箭头间夹角余弦值较大,并且箭头连线较长,说明这 3 种理化因子与土壤有机碳含量成正相关,与土壤无机碳含量(B)成负相关;由夹角间的余弦值判断,速效钾(c)与土壤无机碳含量负相关;全盐(g)箭头长度较短,根据其方向判断全盐与土壤有机碳含量有正相关关系,但相关性不大;容重(d)与土壤有机碳含量负相关;此外,由夹角大小可以看出 pH(f)对土壤有机、无机碳含量影响较小。

表 1 土壤理化因子含量特征分析
Table 1 Analysis of characteristics of soil physical and chemical factors

土层深度/ cm Soil depth	土地利用 类型 Land-use types	全氮/(g/kg) Total N		有效磷/(mg/kg) Available P		速效钾/(mg/kg) Available K		容重/(g/cm ³) Bulk density		土壤含水量/% Soil moisture		pH		电导率/(mS/cm) EC		全盐/(g/kg) Total salt		
0~20	I	2.03±0.85	Aa	62.60±62.18	Aa	4033.50±3846.88	Aa	1.08±0.10	Ae	33.60±11.93	Aa	8.64±0.15	Aa	10.33±4.08	AaB	75.07±31.66	Aa	
	II	0.58±0.21	Ab	21.59±16.46	Ab	117.25±24.66	Ab	1.16±0.02	Ad	33.15±5.48	Aa	8.20±0.28	AaB	0.38±0.19	Ac	1.47±0.72	Ac	
	III	0.32±0.13	Abc	35.72±18.34	AaB	165.25±93.77	Ab	1.27±0.02	Ac	27.30±2.56	Bad	7.60±0.17	Bc	1.26±0.48	Ac	5.32±2.56	Ac	
	IV	0.44±0.15	Abc	19.78±11.50	Ab	271.00±54.42	Ab	1.16±0.03	Ad	32.70±7.81	Aad	8.15±0.46	Ab	3.59±0.96	Abc	17.90±4.84	Abc	
	V	0.23±0.06	Abc	5.95±2.95	Ab	679.50±603.56	Ab	1.36±0.02	Ab	23.58±3.45	ABd	8.59±0.13	AaB	17.81±13.60	Aa	75.73±44.52	Aa	
	VI	0.15±0.05	Abc	4.01±2.87	Ab	306.25±103.21	Ab	1.40±0.01	Ab	17.68±4.70	Bb	8.15±0.31	Ab	8.03±3.23	Abc	37.01±13.75	Ab	
	VII	0.06±0.01	Ac	1.59±0.36	Ab	81.50±62.38	Ab	1.52±0.02	Aa	5.28±1.27	Bc	8.15±0.49	Ab	2.13±1.70	Ac	8.53±6.69	Abc	
	VIII	0.32±0.19	Bac	5.52±5.09	ABa	789.75±574.01	ABa	1.13±0.03	Ae	39.3±11.42	Aa	8.65±0.27	Aa	3.31±1.11	Bab	14.72±7.89	Bab	
20~50	I	0.30±0.14	Bac	6.33±6.28	ABa	82.75±36.85	Ab	1.18±0.02	Ad	30.00±5.70	Abc	8.15±0.44	AaB	0.43±0.35	Ac	1.84±1.68	Ab	
	II	0.21±0.12	AaB	4.90±2.28	Ba	134.75±54.14	Ab	1.28±0.02	Ac	34.80±5.12	AaB	8.05±0.26	AaB	0.45±0.26	Bc	1.69±0.95	Bb	
	III	0.36±0.14	ABa	4.34±3.88	Ba	148.50±55.87	Bb	1.14±0.03	Ae	35.75±5.73	AaB	8.14±0.48	Ab	1.52±0.98	Bbc	7.54±5.99	Bb	
	IV	0.21±0.06	AaB	4.47±2.38	ABa	329.25±277.00	Ab	1.38±0.02	Ab	22.50±4.86	Ac	8.33±0.15	AaB	5.58±3.96	Aa	27.82±26.20	ABa	
	V	0.16±0.10	Abc	2.49±2.05	Aa	108.00±25.07	Bb	1.39±0.03	Ab	21.68±3.58	ABc	7.88±0.22	AaB	2.15±0.86	Bbc	10.65±4.91	Bb	
	VI	0.06±0.00	Ab	1.12±0.41	Aa	93.75±70.17	Ab	1.52±0.02	Aa	7.93±2.60	ABd	8.18±0.55	Ab	2.07±2.00	Abc	8.27±7.73	Ab	
	VII	0.19±0.11	Bab	2.30±0.91	Bb	178.75±96.35	Ba	1.16±0.01	Ad	29.73±17.78	Aa	8.69±0.56	Aa	1.50±1.49	Bb	5.94±5.86	Bb	
	VIII	0.22±0.13	Ba	1.98±0.82	Bb	115.25±111.26	AaB	1.17±0.03	Ad	34.60±5.01	Aa	8.05±0.41	AaB	0.70±0.36	Ab	2.72±1.33	Ab	
50~80	I	0.26±0.06	Aa	6.32±5.60	Ba	135.75±32.91	AaB	1.25±0.03	Ac	36.48±5.58	Aa	7.97±0.31	ABb	0.50±0.26	Bb	1.86±0.91	Bb	
	II	0.20±0.07	Bab	1.82±0.30	Bb	128.75±33.93	Bab	1.14±0.09	Ad	34.68±11.77	Aa	7.93±0.45	Ab	1.70±1.00	Bb	8.60±6.43	Bab	
	III	0.23±0.06	Aa	2.23±0.66	Bb	208.25±53.40	Aa	1.27±0.06	Bc	24.68±6.10	Aa	8.30±0.43	AaB	4.84±3.97	Aa	21.81±21.13	Ba	
	IV	0.17±0.16	AaB	3.57±3.52	AaB	115.00±35.60	Bab	1.38±0.02	Ab	27.65±4.80	Aa	8.10±0.58	AaB	1.97±1.27	Bb	9.55±7.19	Bab	
	V	0.06±0.01	Ab	1.47±0.51	Ab	76.75±57.85	Ab	1.54±0.02	Aa	10.23±1.94	Ab	8.16±0.45	AaB	1.41±0.93	Ab	5.92±3.92	Ab	
	VI																	
	VII																	
	VIII																	

注:小写字母为土壤有机、无机碳含量在同一土层不同土地利用类型间多重比较;大写字母为有机、无机碳含量在同一土地利用类型不同土层间多重比较。

Note: The lowercase letters are soil organic and inorganic carbon contents are compared between different land use types in the same soil layer. The capital letters are organic and inorganic carbon contents are compared between different soil layers in the same land use type.

表2 土壤有机、无机碳含量变化的解释变量典范分析

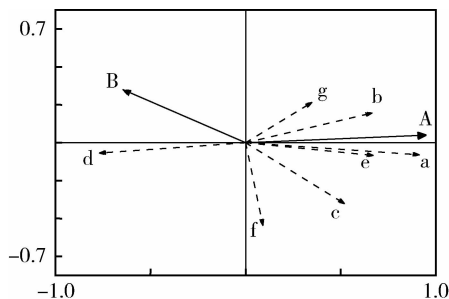
Table 2 The RDA of the soil SOC and SIC

结果信息 Result	排序轴 1 Axis 1	排序轴 2 Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.780	0.014
物种与环境的相关系数 Species-environment correlations	0.937	0.356
物种数据方差累积百分比/% Cumulative percentage variance of species	78.000	79.400
物种与环境关系累积百分比/% Cumulative percentage variance of species-environment relation	98.200	100.000
典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	0.794	

表3 物种、环境因子前两个 RDA 排序轴及环境因子间的相关性

Table 3 Correlation coefficients for species axis 1 and axis 2, environmental factors axis 1 and axis 2, and environmental factors

指标 Index	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2	全氮 Total N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	容重 Bulk density	土壤含 水量 Soil moisture	pH
SPEC AX2	0.075									
ENVI AX1	0.936	0.000								
ENVI AX2	0.000	0.356	0.000							
全氮 Total N	0.855	-0.022	0.913	-0.063						
有效磷 Available P	0.622	0.057	0.665	0.159	0.700					
速效钾 Available K	0.487	-0.115	0.520	-0.322	0.550	0.714				
容重 Bulk density	-0.719	-0.020	-0.768	-0.056	-0.520	-0.315	-0.208			
土壤含水量 Soil moisture	0.628	-0.024	0.671	-0.066	0.355	0.241	0.106	-0.731		
pH	0.085	-0.156	0.091	-0.438	0.160	-0.050	0.209	-0.087	-0.049	
全盐 Total salt	0.326	0.076	0.348	0.214	0.379	0.285	0.548	-0.034	-0.067	0.257



A: 有机碳 SOC; B: 无机碳 SIC; a: 全氮 Total N; b: 有效磷 Available P; c: 速效钾 Available K; d: 容重 Bulk density; e: 土壤含水量 Soil moisture; f: pH; g: 全盐 Total salt

图2 土壤有机、无机碳含量-理化因子相关性的 RDA 二维排序图

Fig. 2 Two dimensional ordination diagram of redundancy analysis of soil SOD and SIC

利用偏蒙特卡洛置换检验进一步分析各理化因子对土壤有机碳、无机碳的影响,结果如表4所示。检验后获得7种理化因子的重要性排序,其顺序为:全氮>容重>土壤含水量>有效磷>速效钾>全盐>pH。全氮、容重、土壤含水量、有效磷、速效钾、全盐对土壤有机碳、无机碳含量的影响达到显著性水平,其对土壤有机碳、无机碳变化的贡献率分别为65.0%、46.0%、35.1%、34.5%、21.2%和9.5%,而pH对土壤有机碳、无机碳的影响不显著,贡献率仅为0.9%。以上数据说明,养分因子与容重、土壤含水量、全盐是影响土壤有机碳、无机碳的重要性因子,而pH对土壤有机碳、无机碳含量影响相对较小。

表 4 理化因子变量解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 4 Importance and signification level of physicochemical factors

理化因子 Physicochemical factors	重要性排序 Importance rank	解释量/% Explanation	重要性 Importance	显著性 Significance
全氮 Total N	1	65.0	152.241	0.002
容重 Bulk density	2	46.0	69.885	0.002
土壤含水量 Soil moisture	3	35.1	44.388	0.002
有效磷 Available P	4	34.5	43.158	0.002
速效钾 Available K	5	21.2	22.122	0.002
全盐 Total salt	6	9.5	8.629	0.002
pH	7	0.9	0.756	0.388

2.3.2 单一理化因子对土壤有机碳、无机碳含量影响分析

为进一步探究重要性因子与土壤有机、无机碳间的关系,分别针对全氮、容重、土壤含水量、有效磷、速效钾和全盐这 6 个环境因子做 T-value 检验。T-value 双序图包含了物种箭头、环境因子箭头和圆圈符号,它能够准确揭示物种依赖环境因子的程度。分析结果如图 3 所示。实线圈反映正相关,虚线圈反映负相关。对全氮进行分析,有机碳箭头完全落入实线圈,无机碳箭头完全落入虚线圈,表明全氮与有机碳呈显著正相关与无机碳呈显著负相关,即随着全氮含量的增加有机碳含量逐渐增大,而无机碳含量呈现出相反的变化规律;从有效磷与土壤有机、无机碳相关性排序图中可以看出有效磷这一单一因子对土壤有机、无机碳的影响相对较弱;速效钾仅对无机碳呈现极显著负相关,与有机碳未呈现显著相关性;通过对容重的分析可知,容重与有机碳有较好的负关联度,与无机碳呈正相关,但相关性不显著;土壤含水量与土壤有机、无机碳的相关性和全氮较为相似,即与有机碳显著正相关与无机碳显著负相关;无机碳箭头部分落入全盐虚线圈内,说明土壤无机碳与全盐具有较高的相关性。综上所述,有机碳受有全氮、容重和土壤含水量的影响,而无机碳则主要受全氮、土壤含水量和全盐的影响。

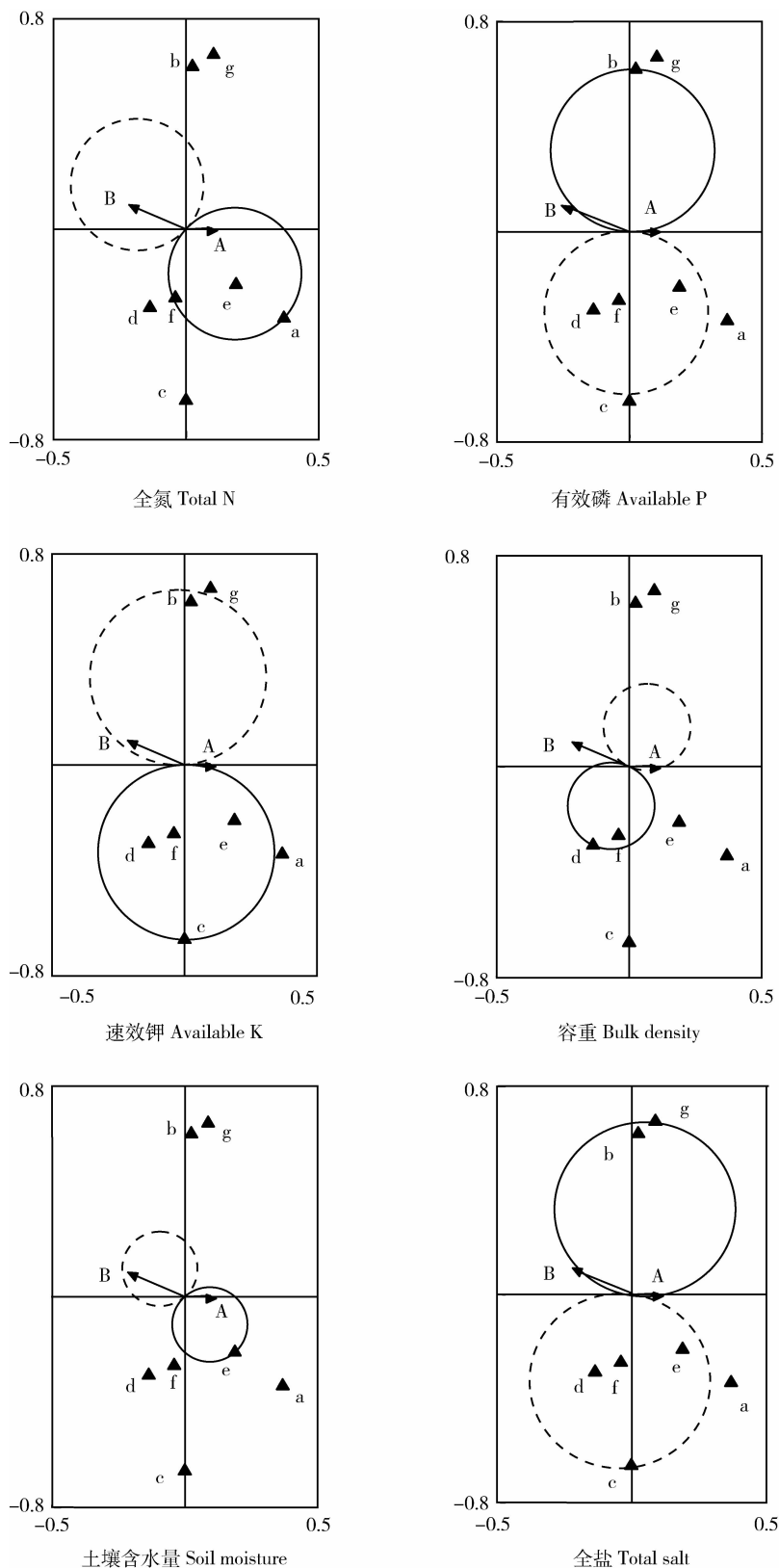
3 结论与讨论

3.1 土地利用类型对土壤有机碳、无机碳含量特征的影响

土地利用是人类活动干扰最直接的结果,在不

同土地利用方式下,地表植被和土壤所受的干扰程度不同,导致有机碳和无机碳含量存在显著差异。此外土地利用方式的转变也会引起土壤垂直剖面上有机碳和无机碳含量的变化^[15]。土壤有机碳含量是土壤、植被覆盖和人为干扰等多重因素综合影响下有机碳动态平衡的结果^[16]。研究区内 7 种土地利用类型间有机碳含量差异性显著。其中天然林地的有机碳含量及植被覆盖度最高,其土壤表层植物残体积累量多,腐质化作用明显,土壤丰富的凋落物和根系分泌物使其有机碳含量优于其他土地利用类型;而沙地的有机碳含量最低,这与其表面植被覆盖较少或基本无覆盖有关,此外松散的土壤结构使其表土碳输入量减少,因此沙地有机碳含量明显低于其他土地利用类型。在土壤垂直剖面上天然林、果园、人工林和盐碱地土壤有机碳含量均随土层深度增加而降低,这种分布规律与地表植被枯落物以及常年不变动的土层结构密切相关^[17-18]。而棉田土壤在 20~50 cm 土层有机碳含量低于 50~80 cm 的非耕作土层,这是因为定期栽种作物所采取的翻耕措施会频繁改变土壤结构,从而加快土壤呼吸,导致土壤中的碳释放速率增加^[19]。另外荒草地、沙地地表碳输入量相对较少,地表以下碳含量处于稳定状态,故其有机碳含量在各土层间差异不显著。

土壤无机碳主要指存在于干旱、半干旱土壤中的碳酸盐,其含量的高低与母质的岩性有关^[20]。土地利用方式的改变将会影响土壤无机碳的淋溶和淀积过程。本研究中沙地无机碳含量最高,研究区的沙地主要由风成沙性母质的土壤发育而来,该土壤母质在成土过程中有明显的碳酸钙积累现象,土壤



A: 有机碳 SOC; B: 无机碳 SIC; a: 全氮 Total N; b: 有效磷 Available P; c: 速效钾 Available K; d: 容重 Bulk density; e: 土壤含水量 Soil moisture; f: pH; g: 全盐 Total salt

图3 单一关键理化因子对土壤有机、无机碳含量影响的检验结果

Fig. 3 T-test results for single crucial physicochemical factors influencing soil SOC and SIC

中含有丰富的 Ca^{2+} , 有助于形成碳酸盐^[21-22], 因此沙地无机碳含量明显高于其他土地利用类型。天然林的无机碳含量最低, 这是由于天然林土壤表层覆盖物较多, 土壤侵蚀弱, 受到的淋溶作用较小, 这种条件不利于碳酸盐的形成, 相反会促进其转化^[23-25]。干旱区表层土壤中的碳酸盐通过淋溶作用将逐渐迁移并积累在深层次土壤中^[26-27], 无机碳在土壤垂直剖面上的分布也具有一定的规律性。天然林土壤的无机碳含量随着土层深度逐渐增加, 当土壤有机碳分解转化为无机碳时, 形成的次生碳酸盐将会迁移到较深的土层, 因此其钙积层较深。而其他土地利用类型土壤由于受到水分等条件的限制整体呈现低-高-低的分布态势, 钙积层主要集中在 20~50 cm 土层。

3.2 理化因子对土壤有机、无机碳含量特征的影响

土壤有机碳和无机碳含量与土壤环境条件密切相关, 土壤理化性质不仅受到土壤有机碳含量的影响, 而且受到无机碳的影响。土壤碳含量能够直接影响土壤养分供应能力, 是土壤理化性质变化的原动力^[28], 土壤理化因子通过对植被和土壤结构的影响改变土壤碳含量及分布^[29], 二者息息相关。研究区土壤有机碳和无机碳含量特征在干旱区土壤母质的环境背景下有其普遍性特征, 但由于人为活动和地形等局地影响, 土壤理化因子与土壤有机碳、无机碳间存在不同的作用和影响机制。本研究土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化因子的相关分析表明, 土壤养分、水分因子等对土壤碳含量有显著的影响。

研究区有机碳和无机碳含量均受到养分元素的影响。对土壤有机碳含量影响最大的养分因子是全氮, 对土壤无机碳含量影响最大的养分因子是全氮和速效钾, 且均呈现极显著相关关系。土壤氮磷等养分对土壤有机碳、无机碳含量的影响主要与土壤微生物的分解活动的有关, 这使得土壤碳氮磷含量发生同步变化, 且土壤有机碳直接影响土壤养分供应^[30], 故土壤有机碳含量与全氮呈极显著正相关性, 无机碳含量与全氮和速效钾呈极显著负相关性。周莉等^[31]研究表明土壤营养成分与有机碳的关系往往与无机碳的关系呈现相反的变化, 在土壤碳平衡过程中起相互补偿作用。土壤养分状况会显著影响有机碳在土壤中的蓄积, 不仅可利用的养分状况直接影响植被的生长, 而且微生物同化 1 份的 N 需 5 份 C^[32], 土壤中矿质态 N 的有效性直接控制土壤有机碳的分解速率。Nadelhoffer 等^[33]对地中海

橡树林土壤碳的研究发现, 土壤中的碳酸钙会与氮硝化作用生成的酸根离子反应, 从而降低土壤中的无机碳含量。徐薇薇等^[34]对干旱区不同生境土壤有机碳含量的影响因子进行研究, 同样也发现土壤有机碳含量与全氮呈极显著正相关性。

本研究中土壤水分与土壤有机碳和无机碳关系也呈现相反的规律。土壤水分含量是土壤微生物活性限制因子, 也是限制植物生长和有机物分解的重要因素^[35]。水分可改变土壤环境的氧气条件并对微生物活性产生影响, 进而影响到土壤有机碳矿化, 同时高的土壤含水量能够改善土壤的通透性从而利于土壤有机碳的积累, 但较高的土壤含水量会使土壤的碳酸盐通过淋溶作用丢失, 使得土壤中无机碳积累较少^[34]。在干旱、高温等条件下, 研究区土壤水分含量较低, 好氧型微生物活动活跃, 这使得有机碳分解量增加, 从而影响土壤无机碳的含量。相关研究表明, 地下水埋深也间接影响了土壤的含水量, 这也在一定程度上影响着研究区土壤有机碳和无机碳的含量^[36]。

容重能够反映土壤的通透性及土壤水分、空气的流通性, 其大小显著影响土壤有机碳含量^[34]。本研究土壤容重与有机碳呈负相关关系, 这与徐薇薇等^[34]在干旱区的研究结果一致。土壤有机碳含量的增加使土壤结构性增强, 土壤疏松, 土壤容重减少, 土壤硬度也同步减弱, 从而降低机械阻力, 最终影响植物的生长^[36], 但这反而有利于无机碳的累积。此外, 土壤含水量状况是 CaCO_3 淀积的基础, 其流动性为上层土壤提供淋溶动力, 在碳酸钙淀积过程的起到重要作用, 较高的土壤含水量可改善土壤的通透性从而有利于土壤有机碳的积累^[37]。

研究中土壤全盐与无机碳呈正相关关系, 研究区地处极端干旱区, 降水量与蒸发量的极大反差致使土壤盐渍化、荒漠化等现象不断增加^[35], 土壤全盐与无机碳间的正相关关系说明土壤无机碳的累积是由土壤盐碱化、荒漠化引起的。有关土壤盐渍化和荒漠化的相关研究表明, 碳吸收过程中存在无机碳的固定过程, 土壤中固定的大规模碳是在一种非生物无机碳吸收过程中积累的大量的碳, 荒漠化地区也存在难以解释的较大规模的碳吸收过程, 这很可能存在于无机碳的固定过程当中^[36-37]。由此可知, 土壤盐渍化与无机碳之间的关系再次得到验证, 同时也说明了干旱区具有巨大的碳储存潜力。

综上所述, 在所有环境因子中, 土壤养分和土壤

水分因子对土壤有机碳、无机碳含量的影响最大。前人研究多关注土壤养分、土壤水分或土壤盐分单独对土壤碳含量的影响,且多考虑土壤有机碳特征,而对土壤无机碳关注甚少^[26,37]。根据研究区的土壤系统的状况,对土壤碳的研究,若单独考虑土壤养分、土壤水分等影响因子对土壤有机碳的影响具有一定的局限性,因为土壤无机碳中的无机碳酸盐等是植物生长发育不可或缺的要害。本研究综合考虑了土壤养分、土壤水分、容重等多类环境因子,并结合了冗余分析方法分析了土壤与环境因子的相关性,探讨了多因子之间的相互作用,这是对于干旱区土壤碳库研究成果的有力补充。

参考文献 References

- [1] Carolina N. Inorganic carbon and the global C cycle[J]. *Soil Science*, 2006, 171(11): 879-881
- [2] Pringle M J, Allen D E, Phelps D G, Bray S G, Orton T G, Dalal R C. The effect of pasture utilization rate on stocks of soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid tropical grassland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 195: 83-90
- [3] 刘伟,程积民,高阳,程杰,梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76
Liu W, Cheng J M, Gao Y, Cheng J, Liang W P. Distribution of soil organic carbon in grassland on loess plateau and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 68-76 (in Chinese)
- [4] Matsuura S, Sasaki H, Kohyama K. Organic carbon stocks in grassland soils and their spatial distribution in Japan [J]. *Grassland Science*, 2012, 58(2): 79-93
- [5] 张晓伟,许明祥. 关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素:以陕西武功县为例[J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2793-2799
Zhang X W, Xu M X. Soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in farmland of guanzhong plain: A case study in Wugong County, Shaanxi Province [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2793-2799 (in Chinese)
- [6] Uri V, Varik M, Aosaar J, Kanal A, Kukumägi M, Lohmus K. Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) forest chronosequence[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 267: 117-126
- [7] Liu W G, Wei J, Cheng J M, Kanal A, Kukumägi M, Lohmus K. Profile distribution of soil inorganic carbon along a chronosequence of grassland restoration on a 22-year scale in the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2014, 121: 321-329
- [8] 刘淑丽,林丽,杜岩功,李以康,张法伟,郭小伟,欧阳经政,曹广明. 青海省高寒草甸不同退化阶段土壤无机碳分异特征[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1290-1296
Liu S L, Lin L, Du Y G, Li Y K, Zhang F W, Guo X W, Ouyang J Z, Cao G M. The variation of soil inorganic carbon of alpine meadow at different degeneration stages in Qinghai Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1290-1296 (in Chinese)
- [9] 祖元刚,李冉,王文杰,苏冬雪,王莹,邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 5207-5216
Zu Y G, Li R, Wang W J, Su D X, Wang Y, Qiu L. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5207-5216 (in Chinese)
- [10] 缙倩倩,屈建军,韩致文,肖建华. 西北干旱半干旱区生态系统碳循环研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 205-210
Gou Q Q, Qu J J, Han Z W, Xiao J H. Progress of carbon cycle research in arid and semi-arid areas ecosystem of China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 205-210 (in Chinese)
- [11] 许文强,陈曦,罗格平,蔺卿. 土壤碳循环研究进展及干旱区土壤碳循环研究展望[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 614-620
Xu W Q, Chen X, Luo G P, Lin Q. Progress of research on soil carbon cycle using carbon isotope approach[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 614-620 (in Chinese)
- [12] 黄湘,陈亚宁,李卫红,刘加珍,陈亚鹏. 塔里木河中下游怪柳群落土壤碳通量及其影响因子分析[J]. *环境科学*, 2006, 27(10): 1934-1940
Huang X, Chen Y N, Li W H, Liu J Z, Chen Y P. Analysis of carbon flux of soil and its related factors from tamarix spp community in the middle and lower reaches of Tarim River[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10): 1934-1940 (in Chinese)
- [13] 刘世荣,王晖,栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448
Liu S R, Wang H, Luan J W. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437-5448 (in Chinese)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999
Lu R K. *Soil Agrochemistry Analysis* [M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [15] 王棣,耿增超,余雕,和文祥,侯琳. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1569-1577
Wang D, Geng Z C, She D, He W X, Hou L. Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon

- storage under different forest types in the Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1569-1577 (in Chinese)
- [16] 罗友进, 魏朝富, 李渝, 任镇江, 廖和平. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 0257-0266
- Luo Y J, Wei C F, Li Y, Ren Z J, Liao H P. Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 0257-0266 (in Chinese)
- [17] Zhang H J, Ding W X, Yu H Y, He X H. Carbon uptake by a microbial community during 30-day treatment with ^{13}C -glucose of a sandy loam soil fertilized for 20 years with NPK or compost as determined by a GC-C-IRMS analysis of phospholipid fatty acids [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57(2013): 228-236
- [18] 郭芳芳, 李永梅, 李朝丽, 王自林. 纳板河流域土地利用变化对土壤有机碳及微生物生物量碳和氮的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2473-2478
- Guo F F, Li Y M, Li C L, Wang Z L. Effects of land use change on soil organic carbon and microbial biomass carbon and nitrogen in Naban River watershed, Yunnan Province of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10): 2473-2478 (in Chinese)
- [19] Necpalova M, Li D, Lanigan G, Humphreys J. Changes in soil organic carbon in a clay loam soil following ploughing and reseeded of permanent grassland under temperate moist climatic conditions [J]. *Grass Forage Science*, 2014, 69(4): 611-624
- [20] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 986-990
- Yang L F, Li G T. Advances in Research of Soil Inorganic Carbon [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 986-990 (in Chinese)
- [21] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 杜东伟. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价 μ [J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 4136-4143
- Gong L, Zhang H F, Lv G H, Du D W. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 4136-4143 (in Chinese)
- [22] 张雪妮, 吕光辉, 贡璐, 秦璐, 李尝君, 孙景鑫, 任曼丽. 新疆艾比湖湿地自然保护区不同土壤类型无机碳分布特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1084-1090
- Zhang X N, Lv G H, Gong L, Qin L, Li C J, Sun J X, Ren M L. Analysis on soil inorganic carbon of different soil types in the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve in Xinjiang [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 1084-1090 (in Chinese)
- [23] 刘梦云, 常庆瑞, 杨香云. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤碳组分的差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1418-1425
- Liu M Y, Chang Q R, Yang X Y. Soil carbon fractions under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1418-1425 (in Chinese)
- [24] Li L L, Wang Z H, Wang X N, Zhang W W, Li X, Li S X. Effects of soil-surface mulching on organic carbon, inorganic carbon and light fraction organic carbon in dryland soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 478-483
- [25] 刘丽娟, 王玉刚, 李小明. 干旱区绿洲土壤可溶性无机碳的空间分布空间[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2539-2544
- Liu L J, Wang Y G, Li X Y. Spatial distribution pattern of soil dissolved inorganic carbon in an arid oasis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2539-2544 (in Chinese)
- [26] 赵洋, 陈永乐, 张志山, 吴攀, 回嵘, 虎瑞, 高艳红. 腾格里沙漠南缘固沙区深层土壤无机碳密度及其垂直分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 206-210
- Zhao Y, Chen Y L, Zhang Z S, Wu P, Hui R, Hu R, Gao Y H. Soil inorganic carbon density and distribution characteristics sand-fixed dunes in the Tengger Desert, Northern China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 206-210 (in Chinese)
- [27] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- Chen Z, Lv C H, Fan L, Wu H. Effects of land use change on soil organic carbon: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5358-5371 (in Chinese)
- [28] Kemanian A R, Julich S, Manoranjan V S, Arnold J R. Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(12): 1913-1921
- [29] Edwards K R, Picek T, Cizkova H, Zemanová K W, Stará A. Nutrient addition effects on carbon fluxes in wet grasslands with either organic or mineral soil [J]. *Wetlands*, 2015, 35(1): 55-68
- [30] 王存龙, 刘华峰, 王红晋, 赵西强, 崔元俊, 王增辉, 战金成. 山东黄河下游流域土壤碳储量及时空变化研究[J]. *地球与环境*, 2014, 42(2): 228-237
- Wang C L, Liu H F, Wang H J, Zhao X Q, Cui Y J, Wang Z H, Zhan J C. Spatial and temporal changes in soil carbon storage in the Lower Yellow River Basin Shandong Province [J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(2): 228-237 (in Chinese)
- [31] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105
- Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of

- soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1):99-105 (in Chinese)
- [32] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass; a global-scale synthesis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13):1627-1637
- [33] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gungersen P, Kjønaas O J, Koopmans C J, Schleppi P, Tietema A, Wright R F. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests[J]. *Nature*, 1998, 398(6723):145-148
- [34] 徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6):1558-1561
- Xu W W, Qiao M. Soil carbon contents in relation to soil physicochemical properties in Arid Regions of China [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1558-1561 (in Chinese)
- [35] 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 解丽娜. 塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性[J]. *环境科学*, 2016, 37(4):1517-1522
- Gong L, Zhu M L, Liu Z Y, Xie L N. Correlation among soil organic carbon, soil inorganic carbon and the environmental factors in a typical oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4):1517-1522 (in Chinese)
- [36] Rey A, Petsikos C, Jarvis P G, Grace J. Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 589-599
- [37] 赵锐峰, 张丽华, 赵海莉, 姜朋辉, 汪建珍. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *地理科学*, 2013, 33(3):363-370
- Zhao R F, Zhang L H, Zhao H L, Jiang P H, Wang J Z. Distribution of soil organic carbon of wetlands in the middle reaches of the Heihe River and its influencing factors[J]. *Science Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 363-370 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华