

# 盐渍化弃耕地不同恢复模式下土壤有机碳及呼吸速率的变化<sup>①</sup>

闫靖华, 张凤华\*, 李瑞奎, 杨海昌

(石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003)

**摘要:** 对干旱区盐渍化弃耕地不同恢复模式下土壤有机碳及呼吸速率的变化特征进行分析, 结果表明: 盐渍化弃耕地不同恢复模式下土壤有机碳含量为人工草地 > 补水 > 补植 > 原始弃耕地, 盐渍化弃耕地通过植被恢复后逐步向碳积累的过程转变, 呈现碳汇现象, 其中, 人工草地的土壤有机碳含量和有机碳密度分别比弃耕地高出 63.45% 和 65.47%。土壤有机碳与土壤速效养分存在着密切的正相关关系。植被恢复后明显增加了土壤呼吸速率, 不同恢复模式下土壤呼吸温度敏感系数  $Q_{10}$  的值为人工草地(1.48) > 补水(1.21) > 补植(1.15) > 原始弃耕地(1.13); 土壤有机碳与土壤呼吸速率之间呈显著正相关关系, 与温度敏感系数呈正相关关系。

**关键词:** 植被恢复; 土壤有机碳; 土壤呼吸速率;  $Q_{10}$  值; 盐渍化弃耕地

**中图分类号:** S153.6

土壤碳库是地球表层最大的碳库, 在全球碳循环中起着关键作用。全球土壤有机碳总储量在  $1.5 \times 10^{15} \sim 2.0 \times 10^{15}$  kg 之间, 约为大气  $\text{CO}_2\text{-C}$  总量的 3 倍, 生物碳库的 3.8 倍, 而土壤呼吸是土壤碳库向大气输出的主要途径<sup>[1-2]</sup>。农田土壤呼吸是土壤碳循环中最活跃的部分, 也是陆地生态系统中碳循环的重要环节<sup>[3]</sup>。在土壤碳循环过程中土壤呼吸的微小变化不但有可能导致土壤-大气间的碳通量发生巨大的改变, 还会影响土壤碳的吸存能力<sup>[4]</sup>。土壤有机碳及土壤呼吸的变化逐渐成为全球有机碳研究的热点。土壤碳库稳定、增加和减少都与大气二氧化碳密切相关<sup>[5]</sup>。

新疆属于干旱荒漠地区, 占新疆土地总面积 4% 的绿洲却承载了新疆 95% 以上的人口, 绿洲农田土壤质量至关重要。由于长期不合理的灌溉制度及技术破坏了原有的水盐平衡, 在强蒸发条件的影响下促使土地次生盐渍化的加剧导致土地生产力下降, 大面积农田被迫弃耕, 并产生一系列的生态问题<sup>[6]</sup>。土壤盐渍化导致土壤质量的严重下降和土壤碳库的大量损失。Lal<sup>[7]</sup>认为通过生态恢复退化土壤能吸存 60% ~ 75% 从土壤中损失的碳, 估计全球恢复退化土壤的碳吸存潜力为 0.3 ~ 0.8 Pg/a。因此, 研究植被恢复土壤有机碳及土壤呼吸的变化对评估土壤固碳潜力, 增强土壤

碳汇能力具有一定的意义。本文就干旱区重度盐渍化弃耕地不同生态恢复模式下土壤有机碳及土壤呼吸的变化进行研究, 为进一步阐明盐渍化弃耕地恢复前后及不同植被恢复模式下土壤碳汇的功能变化提供一定依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点设在新疆玛纳斯河流域的 147 团, 地理位置处于欧亚大陆中心, 准噶尔盆地南缘, 远离海洋, 干旱少雨, 蒸发量大, 年平均气温  $6.6^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$  积温达到  $3489.7^\circ\text{C}$ , 年降水量  $110 \sim 200$  mm, 年蒸发量  $1500 \sim 2000$  mm, 无霜期  $148 \sim 187$  天, 属于典型的大陆性气候, 该区域处于冲积洪积扇缘, 地下水位高, 历史上长期处于“盐随水来, 水去盐留”的状态, 强烈的蒸发更是加速了盐分的表聚; 再加上长期的不合理灌溉加剧了盐渍化进程, 形成现在的重度盐渍化土。

### 1.2 样地处理以及样品采集

试验点为新疆玛纳斯河流域冲积扇缘地带, 选择因盐渍化严重而弃耕的土地作为样地, 面积  $20 \text{ hm}^2$ , 2008 年对样地进行不同模式的恢复重建, I、原始弃

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171507), 国际科技合作专项项目(2011DFA93140)和高等学校博士学科点专项科研基金(20126518110002)资助。

\* 通讯作者(zfh2000@126.com)

作者简介: 闫靖华(1988—), 女, 安徽萧县人, 硕士研究生, 研究方向为绿洲农业资源高效利用。E-mail: yanjinghua305@126.com

耕地 :作为恢复前的对照处理(2 hm<sup>2</sup>) ;II、补水处理 :在原始弃耕地上适当灌水(4 hm<sup>2</sup>) ;III、补植处理 :在原始弃耕地上补植红砂、碱蓬等植被(4 hm<sup>2</sup>) ;IV、人工草地 :对自然弃耕地进行翻耕人工种植芨芨草(10 hm<sup>2</sup>)。

2011年8月进行采样,每种恢复模式按照0~20、20~40 cm分别走“S”形用土钻取5点土样混合,混合土样采用“四分法”,保留1 kg,每种模式按照同样的方法采取3个重复,共24个土样。土壤样品带回实验室,置于通风、阴凉、干燥的室内风干,分别过1 mm和0.25 mm筛孔以供测定。

### 1.3 测定项目与方法

土壤呼吸速率测定采用开路式土壤碳通量测量系统,测定仪器型号为LI-8100。测定前在每个小区安置测定基座(去除基座内的一切活体),为了减少安置测定基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动较大,应在测定基座安置24 h后再进行测定,于2011年8月17日和10月15日的10:00—20:00,每2个小时测定土壤基座内的土壤呼吸速率,每个处理观测3次重复。在原位观测土壤呼吸的同时,用Omega土壤温度探头测量5 cm深处的土壤温度,土壤湿度用烘干法测定。

在测定土壤呼吸的当日分层取土样,土壤有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤碱解氮用碱解扩散法测定;速效磷用NaHCO<sub>3</sub>浸提,分光光度计测定;土壤体积质量(容重)用环刀法测定。

### 1.4 数据分析

采用Microsoft Office Excel 2003和SPSS 11.5软件进行数据处理和分析。

采用指数模型拟合土壤呼吸速率 $R(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 与温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 之间的关系<sup>[8]</sup>,即:

$$R = \alpha e^{\beta T} \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 是温度为0 $^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸速率; $T$ 为土壤温度; $\beta$ 为温度反应系数。 $R$ 的温度系数( $Q_{10}$ )表示温度每升高10 $^{\circ}\text{C}$ , $R$ 增加的倍数,通过下式确定<sup>[8]</sup>:

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad (2)$$

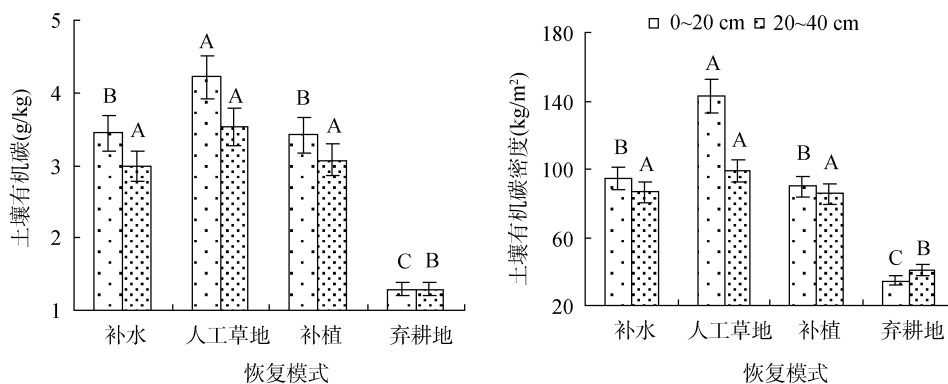
## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复模式下土壤有机碳及其密度的变化

土壤有机碳调节着植物和微生物所需的养分供应,影响着土壤水分和长期的土壤碳储量,是指示土壤健康的关键性指标<sup>[9]</sup>。图1表明,弃耕地恢复显著增加了土壤有机碳的含量,对不同土层有机碳的含量具有明显的影响,各植被类型土壤有机碳含量都随着土层的加深而降低,而自然弃耕地由于植被种类稀少、覆盖度较低,地上及地下生物量降低,土壤有机碳的含量低,不同土层间有机碳含量差异不显著<sup>[10]</sup>。自然弃耕地0~20、20~40 cm土层有机碳含量以及有机碳密度显著低于补水、人工草地、补植等3种不同的恢复模式( $P < 0.01$ )。其原因是通过植被恢复后,地上生物量增加,从而增加了有机碳的输入量。人工草地的土壤有机碳含量和有机碳密度都为最高,且与其他恢复模式差异显著( $P < 0.01$ ),其分别比弃耕地高出63.45%和65.47%。其余恢复模式间土壤有机碳含量及有机碳密度差异不显著。

### 2.2 土壤有机碳与速效养分的相关性分析

土壤有机碳对土壤的物理、化学特征及土壤生物活性有重要影响,对土壤有机碳与速效养分进行相关性分析,结果表明,土壤有机碳含量与土壤碱解氮、速效磷含量之间存在正相关关系,土壤有机碳含量越高,土壤碱解氮、速效磷含量也越高(图2)。土壤生态系统中,有效性氮素是初级生产力的首要限制资源<sup>[11]</sup>,颜淑云等<sup>[12]</sup>研究也表明,土壤全氮及无机氮含量与土壤有机碳含量之间呈极显著正相关关系。本研究土



(图中不同大写字母表示同一土层不同恢复模式间差异在 $P < 0.01$ 水平显著)

图1 不同植被恢复模式下不同土层土壤有机碳含量及有机碳密度

Fig. 1 Soil organic carbon contents and soil organic carbon densities in different soil layer under different models of vegetation restoration

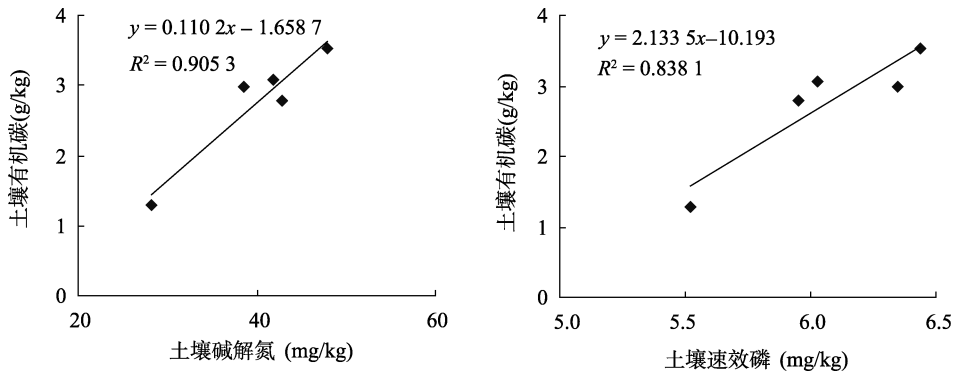


图 2 土壤有机碳与速效养分的关系

Fig. 2 Correlation between soil organic carbon and soil available nutrient

壤有机碳含量与碱解氮含量的直线回归方程和决定系数为： $y = 0.1102x - 1.6587$ ， $R^2 = 0.9053$ ；土壤有机碳含量与速效磷含量的为： $y = 2.1335x - 10.193$ ， $R^2 = 0.8381$ 。土壤有机碳含量与碱解氮、速效磷含量线性相关的斜率分别为 0.11 g/mg 和 2.13 g/mg，说明土壤中碱解氮及速效磷含量分别提高 1 mg/kg，土壤有机碳含量相应提高 0.11 g 和 2.13 g。表明土壤有机碳与土壤速效养分之间存在密切的关系。盐渍化弃耕地通过植被恢复后，随着有机碳的积累，土壤养分在逐渐增加。

2.3 不同恢复模式下土壤呼吸速率的变化

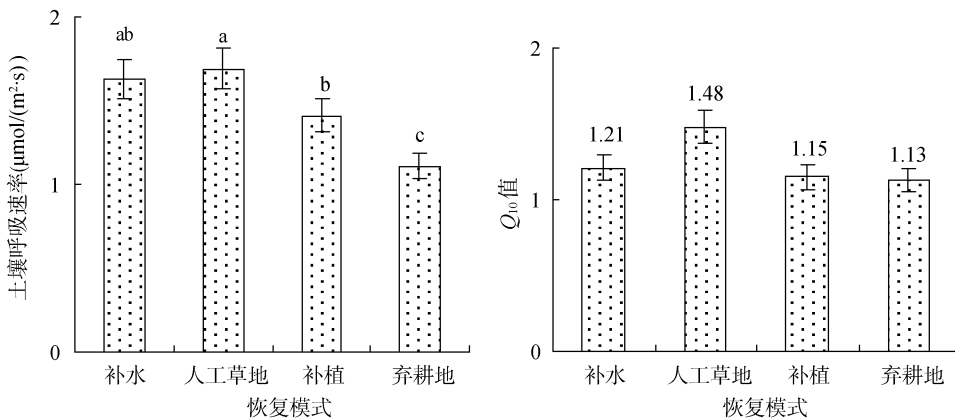
土壤呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 主要来源于土壤微生物、土壤动物和植物根系的呼吸作用及土壤生化反应等方面，其释放量的多少是土壤生物活性强弱的综合指标<sup>[13]</sup>。图 3 显示，自然弃耕地土壤呼吸速率最低，植被恢复后，土壤呼吸速率高于弃耕地，而不同的恢复模式下土壤呼吸速率与弃耕地的差异不同，补水、人工草地、补植等 3 种恢复模式的土壤呼吸速率显著高于弃耕地 32%、34% 和 21%。这种变化特征反映出盐渍化弃耕地通过植被恢复对土壤呼吸速率有着

强烈的影响。

2.4 不同恢复模式下土壤呼吸的温度敏感性

不同恢复模式下土壤呼吸速率均随温度的增加而呈上升的趋势，指数模型能够较好地描述它们之间的这种关系( $R^2 = 0.6866 \sim 0.8011$ )，杨玉盛等<sup>[14]</sup>研究也表明土壤呼吸速率与温度间呈现显著的指数相关性。该模型在植被恢复后的拟合效果好于弃耕地的拟合效果，并且在低温情况下的拟合效果好于高温情况下的拟合效果。这说明温度较低时，根系和微生物的活动主要受到温度的影响；而当温度较高时，微生物的数量增加活性增强，很容易受到其他因素的影响，而此时温度不再是限制因子。不同植被恢复模式土壤呼吸速率与温度之间的关系见表 1。

以不同恢复模式下土壤呼吸速率与温度之间的关系为基础计算 Q<sub>10</sub> 值(图 3)。人工草地的 Q<sub>10</sub> 值最高，Q<sub>10</sub> 值的大小顺序为人工草地(1.48) > 补水(1.21) > 补植(1.15) > 弃耕地(1.13)，表明人工草地和补水的土壤呼吸对温度的敏感性高于补植处理，而盐渍化弃耕地对温度的变化最不敏感，这可能是因为盐渍化弃耕地由于植被覆盖度较低，地表缺乏遮蔽物



(图中不同小写字母表示不同恢复模式间差异在 P < 0.05 水平显著)

图 3 不同恢复模式下土壤呼吸速率与 Q<sub>10</sub> 值

Fig. 3 Soil respiration rates and Q<sub>10</sub> values under different models of vegetation restoration

表 1 不同恢复模式土壤的平均温度(5 cm)和湿度(0~10 cm)及土壤呼吸速率与温度的关系  
Table 1 Soil temperature at 5 cm depth and soil moisture at top 10 cm layer under different models of restoration, and correlation between soil respiration rate and soil temperature

恢复模式	关系等式	$R^2$	$P$	温度(°C)	湿度(%)
弃耕地	$y = 0.8173e^{0.0124x}$	0.6866	0.042	18.27	6.31
补水	$y = 0.9814e^{0.0191x}$	0.8011	0.015	18.76	8.66
人工草地	$y = 0.5844e^{0.0395x}$	0.7833	0.019	18.09	12.73
补植	$y = 0.9843e^{0.0142x}$	0.7946	0.017	18.14	7.38

而暴露在外,可能造成土壤呼吸对温度变化产生了适应症<sup>[15]</sup>。另外,各不同恢复模式下  $Q_{10}$  值均  $< 2.0$ , 明显低于平均水平,但与周洪华等<sup>[16]</sup>的研究结论一致。分别对土壤呼吸的  $Q_{10}$  值与土壤平均温度( $T$ )和土壤平均湿度( $W$ )进行回归分析,结果表明  $Q_{10}$  值与土壤温度呈负相关关系但是不显著,直线回归方程为:  $Q_{10} = -0.1658T + 4.2798$ ,  $R^2 = 0.0983$ ,  $P = 0.686$ , 而与土壤湿度成显著正相关关系,关系式为:  $Q_{10} = 0.057W + 0.7425$ ,  $R^2 = 0.9776$ ,  $P = 0.011$ 。

分析表明,当土壤水分低时(表 1),土壤呼吸温度敏感性指数( $Q_{10}$ )对土壤湿度的变化相较于土壤温度更加显著,这可能是由于过低的土壤水分降低了土层中植物根系和微生物的活性。

## 2.5 不同恢复模式下土壤有机碳与土壤呼吸速率及 $Q_{10}$ 的相关关系

微生物进行分解活动排放  $CO_2$  是以土壤有机碳为物质基础的,因而土壤有机碳对土壤呼吸非常重要。对土壤有机碳和土壤呼吸速率进行相关分析,结果表明,土壤有机碳与土壤呼吸速率呈显著正相关关系,其回归方程为:  $y = 0.2488x + 0.8042$ ,  $R^2 = 0.8212$ ,  $P < 0.05$ (图 4),土壤有机碳的含量越高,土壤呼吸速率也就越快;不同恢复模式下,人工草地的温度敏感系数  $Q_{10}$  最高,这也意味着人工草地的土壤有机碳分解因温度升高而受到的影响相对更加显著。土壤有机碳的变化与温度敏感系数  $Q_{10}$  也呈正相关关系,但相关性不显著,其回归方程为:  $y = 0.1087x + 0.9531$ ,  $R^2 = 0.4284$ ,  $P > 0.05$ 。

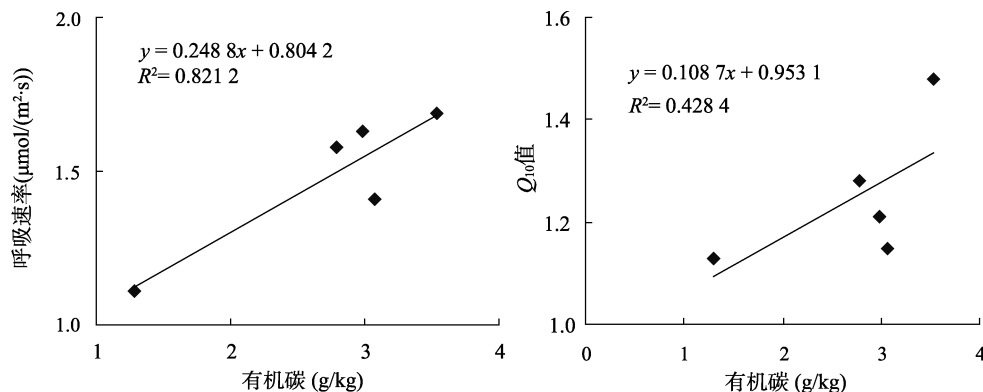


图 4 土壤有机碳与土壤呼吸速率及  $Q_{10}$  值的关系

Fig. 4 Soil organic carbon correlation with soil respiration rate and  $Q_{10}$  value

## 3 结论

(1) 盐渍化弃耕地经植被恢复后不同土层有机碳含量显著提高,表明盐渍化弃耕地在通过植被恢复后逐步向碳积累的过程转变,呈现碳汇现象;这一过程的转变必将会对土壤养分及其环境产生显著影响。土壤有机碳与土壤速效养分存在着密切的正相关关系,土壤中碱解氮、速效磷含量各提高  $1 \text{ mg/kg}$ , 土壤有机碳含量相应提高  $0.11 \text{ g}$  和  $2.13 \text{ g}$ 。

(2) 不同植被恢复模式对温度的敏感性不同,人

工草地和补水处理的土壤呼吸速率对温度的敏感性高于补植处理,而盐渍化弃耕地对温度的变化最不敏感。不同恢复模式下土壤有机碳与土壤呼吸速率之间呈正相关关系,且相关性达到显著水平,表明土壤有机碳的含量越高,供给土壤微生物呼吸的基质越多,因而土壤呼吸的速率越大;土壤有机碳与温度敏感系数也呈正相关关系,但相关性不显著。

(3) 本文对弃耕地不同恢复模式下土壤有机碳动态变化和土壤呼吸的特性以及两者之间的相互关系进行了研究,本实验开展的时间比较短,所获得的数据

有限, 较难建立起长期恢复过程中土壤呼吸和土壤有机碳动态变化的关系。以后应加强对这一部分的研究。

#### 参考文献:

- [1] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 37(2): 175-188
- [2] Raich JW, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-90
- [3] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99
- [4] Schlesinger WH, Andrews JA. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20
- [5] Smith WN, Grant BB, Desjardins RL, Qian B, Hutchinson J, Gameda S. Potential impact of climate change on carbon in agricultural soils in Canada 2000-2099[J]. Climatic Change, 2009, 93(3/4): 319-333
- [6] 邱扬, 王勇, 傅伯杰, 王军, 孟庆华. 土壤质量时空变异及其与环境因子的时空关系[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 42-50
- [7] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect[J]. Progress in Environmental Science, 1999, 1(4): 307-326
- [8] Luo YQ, Wan SQ, Hui DF, Wallace Linda L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413(6856): 622-625
- [9] Percival HJ, Parfitt RL, Scoot NA. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: is clay content important? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1 623-1 630
- [10] 于健龙, 石红霄, 李剑, 赵常玉. 不同退化程度高寒蒿草草甸基况的初步研究[J]. 草业科学, 2010, 27(9): 115-118
- [11] Vitousek PM, Howarth RW. Nitrogen limitation on land and in the sea[J]. Biogeochemistry, 1991, 13: 87-115
- [12] 颜淑云, 周志宇, 秦彧, 邹丽娜. 玛曲高寒草地不同利用方式下土壤氮素含量特征[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 153-159
- [13] Yi ZG, Yi WM. Proceeding of studies on soil respiration of forest ecosystem[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 361-365
- [14] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 董彬, 李震, 高人. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 584-590
- [15] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 董云社, 王智平, 熊小刚, 阎志丹. 土壤呼吸对温度升高的适应[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2 649-2 655
- [16] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 曹志超, 李稚. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 190-196

## Changes of Soil Organic Carbon and Soil Respiration Rate Under Different Models of Restoration of Abandoned Salinized Field

YAN Jing-hua, ZHANG Feng-hua\*, LI Rui-xi, YANG Hai-chang

(Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** The changes of soil organic carbon and soil respiration rate under different models of restoration of abandoned salinized field in arid region were studied. The result indicated that soil organic carbon contents under different models of restoration of abandoned salinized field were artificial grassland treatment > appropriate irrigation treatment > supplement planting treatment > original abandon farmland treatment. After vegetation restoration of abandoned salinized field, soil organic carbon changed to the process of carbon accumulation progressively, present carbon sink phenomenon. The soil organic carbon contents and its density of artificial grassland were 63.45% and 65.47%, respectively, higher than that of abandoned field. The regression analysis showed that there were significantly positive correlation between soil organic carbon and soil available nutrient. Soil respiration rate was significantly enhanced after vegetation restoration, soil respiration temperature sensitivity coefficient  $Q_{10}$  value under different models ranked as artificial grassland treatment (1.48) > appropriate irrigation treatment (1.21) > supplement planting treatment (1.15) > original abandon farmland treatment (1.13). There were significantly positive correlations between soil organic carbon and soil respiration, and positive correlations between soil organic carbon and temperature sensitivity coefficient, but no significant.

**Key words:** Vegetation restoration, Soil organic carbon, Soil respiration rate,  $Q_{10}$  value, Abandoned salinized field