

退耕还林还草过程中不同土地利用方式 土壤呼吸作用及其碳收支评估

王建国, 樊 军*, 王 力, 石占飞

(西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用动态密闭气室法对黄土高原水蚀风蚀交错区 9 种土地利用方式植物生长季节内(2010 年 6—10 月)土壤呼吸速率及其主要影响因子进行测定,分析不同土地利用方式间土壤呼吸的差异性和土壤呼吸对温度、土壤水分、叶面积指数等因子的响应,对 7 种土地利用方式土壤碳收支进行了估算。结果表明,植物生长季节内,不同土地利用方式下土壤呼吸速率呈多峰型变化趋势。裸地、农地、梯田农地、苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地、沙柳地、沙蒿地的土壤呼吸速率季节变化范围分别为 0.18~1.05、0.30~2.08、0.50~1.71、0.53~2.78、0.26~1.08、0.39~1.93、0.30~2.27、0.43~1.43、0.39~1.26 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。9 种土地利用方式下土壤呼吸速率均与气温和 5、10、15 cm 地温呈显著相关($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$),而与 0~6 cm 土壤水分相关性不显著。9 种土地利用方式下地温对应的 Q_{10} 值均表现为 15 cm 地温>10 cm 地温>5 cm 地温。研究区域内土壤呼吸速率与其地上植被叶面积指数呈极显著线性相关关系($r=0.679$, $P<0.01$)。

关键词:黄土高原;水蚀风蚀交错区;土壤呼吸;土壤温度;叶面积指数;土壤碳平衡

中图分类号:S152.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2024-09

Soil Respiration and Assessment of the Carbon Budget in the Process of Returning Farmland to Forest and Grassland Under Different Land Use Patterns

WANG Jian-guo, FAN Jun*, WANG Li, SHI Zhan-fei

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil respiration rate and its impact in nine land use patterns were determined within the vegetation growing season (June to October, 2010) in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau. We analyzed the response relationship and difference between soil respirations and soil temperature, soil moisture, leaf area index and other factors under the various land use patterns, and estimated the soil carbon balance in seven land use patterns. The results showed that the soil respiration rate followed a trend of multiple peaks under different land use patterns during the vegetation growing season. Seasonal ranges in soil respiration and bare land, farmland, terrace farmland, *Medicago sativa* land, abandoned farm land, *Stipa bungeana* land, wasted land, *Salix babylonica* land, and *Artemisia desertorum* land, were 0.18~1.05, 0.30~2.08, 0.50~1.71, 0.53~2.78, 0.26~1.08, 0.39~1.93, 0.30~2.27, 0.43~1.43, and 0.39~1.26 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. There were significantly ($P<0.05$) or highly significant ($P<0.01$) correlations between soil respiration rate and the temperature of the air or soil at 5, 10, 15 cm soil depths, but there were no significant correlation with soil moisture at 6 cm depth in nine land use patterns. Soil temperatures at different soil depths corresponding to the Q_{10} values followed the order: 15 cm>10 cm>5 cm. Soil respiration rate and the vegetation leaf area index were significantly and linearly correlated ($r=0.679$, $P<0.01$). Bare net ecosystem showed significantly carbon “source”; and farmland, terraced farmland were the weak performance of the carbon “sink”; but *Medicago sativa* land, abandoned land, *Stipa bungeana* land, wasted land had a significant carbon “sinks”.

Keywords: The Loess Plateau; water-wind erosion crisscross region; soil respiration; soil temperature; leaf area index; soil carbon balance

收稿日期: 2011-04-03

基金项目: 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目(流域水土过程模拟); 中央高校基本科研业务费专项资金(Z109021004)

作者简介: 王建国(1982—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事生态系统修复研究。E-mail: shanshanyilang@163.com

* 通讯作者: 樊 军 E-mail: fanjun162@nwsuaf.edu.cn

土壤呼吸作为陆地生态系统碳素循环的重要环节,是向大气释放 CO₂ 的最大碳源,其微小变化就会引起大气 CO₂ 浓度较大改变^[1]。据估计,全球陆地生态系统由土壤呼吸每年释放到大气的碳通量达到 68~100 PgC^[2-3],约为化石燃料碳排放量的 11 倍^[4],仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值 100~120 PgC·a⁻¹^[5]。因此,对于不同陆地生态系统土壤 CO₂ 排放通量时空变异及其影响因子分析,已成为碳循环和全球变化研究中热点问题之一^[5]。

土地利用方式的变化对于土壤呼吸的影响十分显著^[6]。不同的利用方式(如耕作、排灌条件的改变等)不仅改变了地表植被,而且改变了土壤透气性,从而使土壤有机质含量、微生物的组成和活性、根系生物量等发生改变,相应的土壤呼吸也大不相同^[7-8]。尤其在当前人类活动对自然界的影响越来越大的情况下,土地利用方式的改变对全球土壤 CO₂ 通量的影响是巨大的^[6]。例如,温带地区的湿地在自然状况下,原本是大气 CO₂ 的汇,但由于人类的影响,主要是排灌条件的改变,土壤呼吸作用大大加强,导致大气和湿地间碳转移的改变,乃至影响了全球的碳平衡^[9]。土地利用/覆盖类型变化后,土壤呼吸强度和变化格局将发生变化,并进一步影响陆地生态系统碳“汇”强度和大气 CO₂ 浓度的时间变化格局,但二者的关系还存在较大的不确定性^[10]。已有的文献多集中于对土壤呼吸季节变化及影响因素的研究^[5,11-15],目前特别缺乏黄土高原水蚀风蚀交错区退耕还林还草过程中土壤碳平衡的研究。

黄土高原水蚀风蚀交错区实行退耕还林还草等一系列植被恢复和建设措施,使该区的土地利用方式发生了较大变化。土地利用方式改变导致植被类型转变过程中,土壤呼吸的季节变化动态特征、影响机制、土壤碳“汇”功能等急需进一步研究。本研究选取 9 种

典型的土地利用方式,采用动态密闭气室法测量土壤呼吸季节变化动态及其与温度、水分的关系进行定量分析,研究黄土高原退耕过程对土壤呼吸速率季节变化的影响机制并估算土壤碳平衡,为黄土高原水蚀风蚀交错区碳循环与碳平衡估算提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验观测点位于陕西省榆林市神木县六道沟小流域(东经 110°21′~110°23′,北纬 38°46′~38°51′)。该流域海拔 1 094~1 274 m,是黄土高原向毛乌素沙漠的过渡地带,也处于流水侵蚀的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带,是典型的生态环境脆弱区。该区属中温带半干旱气候,冬春季干旱少雨、多风沙,夏秋多雨。多年平均降水量为 437.4 mm。年平均气温为 8.4 ℃,≥10 ℃活动积温为 3 248.0 ℃,无霜期 153 d,全年日照时数 2 836 h,年总太阳辐射量为 5 922 MJ·m⁻²。地带性土壤为黑垆土,由于长期强烈侵蚀,已被绵沙土、新黄土、红土以及在沙地上发育起来的风沙土、坝地淤土取代。植被类型为干旱草原。最近几年,实行退耕还林还草,天然植被有所恢复。次生天然(长芒草、达乌里胡枝子、蒿类等)植物分布比较广泛。沙柳、沙蒿、柠条等灌木在该地区也有分布。

1.2 样地选择与试验设计

本试验选取的土地利用方式包括裸地、农地、苜蓿地(人工草地)、撂荒地(农地弃耕后不进行人为干扰)、荒草地(多年生草地)、长芒草地(长芒草为该植被演替的顶级群落)和沙柳地、沙蒿地(人工灌木地)等。所选土地利用类型为研究区域退耕还林还草过程中主要的土地利用类型,立地条件及土壤养分状况见表 1 和表 2。裸地地上部分定期除草,保证无植

表 1 试验样地的立地条件
Table 1 The site conditions of the selected land use patterns

土地利用	年限	容重/g·cm ⁻³	饱和导水率/mm·min ⁻¹	总孔隙/%	主要植物
裸地	5	1.37	0.46	0.48	野韭
农地	21	1.35	0.68	0.49	绿豆
梯田农地	21	1.37	0.43	0.48	绿豆
苜蓿地	5	1.40	0.45	0.47	苜蓿
撂荒地	5	1.33	0.55	0.50	拂子茅、硬质早熟禾、茵陈蒿
长芒草地	24	1.52	0.33	0.43	长芒草、苜蓿、达乌里胡枝子
荒草地	15	1.58	1.02	0.40	赖草、阿尔泰狗娃花、茵陈蒿
沙柳地	30	1.67	5.07	0.37	沙柳
沙蒿地	30	1.61	2.21	0.39	沙蒿

物生长;农地为雨养旱地,当年种植作物为绿豆,绿豆成熟期冠层高度为 40 cm;紫花苜蓿人工草地最大生物量时期株高 65 cm 左右;次生天然长芒草草地最大生物量时期株高 45 cm 左右;沙柳灌木林株高 210 cm 左右,林下杂生蒿类;荒草地内杂草丛生。所选样地海拔平均为 1 200 m,除苜蓿地与撂荒地为坡地外,其余样地处于崮顶或高台地,均无坡度。

表 2 不同土地利用方式 0~10 cm 土层土壤养分状况

Table 2 Soil nutrient status at 0~10 cm of different land use patterns

土地利用	有机质/%	全氮/%	碳氮比	铵态氮/ mg·kg ⁻¹	硝态氮/ mg·kg ⁻¹
裸地	0.52	0.033	9.59	20.34	4.38
农地	0.65	0.043	8.86	26.44	18.41
长芒草地	0.87	0.048	10.74	20.10	2.25
坡地苜蓿	0.68	0.038	10.54	20.45	5.41
坡地撂荒地	0.69	0.036	11.47	19.22	2.68
农地梯田	0.94	0.050	11.09	24.46	21.62
荒草地	0.54	0.027	11.62	20.34	1.27
沙柳地	0.44	0.020	16.08	19.72	0.91

沙柳地与沙蒿地处于同一地块,相隔较近,立地条件差异微小,所以土壤养分只测定沙柳地,作为沙地土壤养分含量的代表。所有样地的土壤容重、孔隙度测定深度为 0~10 cm 土层。

1.3 土壤呼吸测定

采用动态密闭气室法测定土壤 CO₂ 排放速率,将 CI-301PS 红外 CO₂ 气体分析仪(美国 CID 公司)和自制的便携式土壤呼吸测量室相连进行测定。为了减少安放底座对土壤的干扰,底座下端被削为刀刃状,测量前 5~10 d,在每个样地内随机选取样方,将有机玻璃底座嵌入土壤中,底座尽量安放在植物间的空地。如果底座内生长植物,应将底座内的植物齐地剪掉,并尽可能不扰动地表的凋落物。经过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动。测量时,用中空有机玻璃壳体做密闭箱,将其紧扣到设置在土壤表面的底座上,同时打开箱内顶部风扇平衡 CO₂ 气体浓度。每间隔 3 s,红外 CO₂ 气体分析仪测量 1 次箱内空气 CO₂ 浓度值,测量时间持续 60 s,每个测量点重复测量 3~5 次。土壤呼吸从 2010 年 6 月下旬开始测定,于 10 月底结束。试验期间每隔 8~10 d 测定 1 次,每次测量在上午 9:00—11:00 之间进行,这一时间土壤呼吸速率测定值与日平均值基本

一致^[16]。

1.4 土壤温度和水分的测定

测定土壤呼吸速率的同时,利用热电偶温度读表(HH82A)连接热电偶探头测量 5、10、15 cm 深度的土壤温度;气温数据来自神木侵蚀与环境试验站的气象观测站;采用 Hydra Probe II (SDI-12/RS485)测量土壤 0~6 cm 深度平均体积含水量。

1.5 植被叶面积指数的测定

叶面积指数(LAI)每个月测定 1 次,每次每个样地测量 6 次重复。一般选择阴天采用线状 PAR 探头测定冠层上方和冠层下方光合有效辐射,然后通过以下公式计算:

$$LAI = -\ln(\tau/A) \quad (1)$$

式中: τ =冠层下方光合有效辐射/冠层上方光合有效辐射; A 在本研究中选取默认值 0.86。

1.6 数据分析与处理

土壤呼吸速率的统计分析(相关分析、独立样本 t 检验、曲线估计)主要利用 SPSS13.0 统计分析软件完成,作图采用 SigmaPlot 和 Excel 数据处理软件。

用 Q_{10} 值来表示土壤呼吸速率对温度变化的敏感程度,并采用较为常用的指数关系模型进行计算^[15]:

$$R_s = a \cdot e^{bT}, Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中: R_s 为土壤呼吸速率; T 为温度; a 、 b 为待定参数。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用方式下土壤呼吸速率的季节变化

图 1 为 2010 年 6—10 月 9 种土地利用方式下土壤呼吸速率的季节变化过程。可以看出,不同土地利用方式下土壤呼吸速率季节变化规律基本一致,呈多峰型变化趋势。从 6 月到 8 月中旬,随着气温回升,植物生长迅速,土壤生物活动旺盛,土壤呼吸速率增大,7 月初和 8 月中旬土壤呼吸速率出现峰值;但由于 6、7 月降雨较少,持续的干旱使土壤水分含量较低,限制了根系呼吸及土壤有机质的矿化作用,进而使 7 月下旬与 8 月初的土壤呼吸速率维持较低状态。从 8 月到 10 月,气温逐渐降低,土壤呼吸速率随之降低。裸地、农地、梯田农地、苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地、沙柳地、沙蒿地的土壤呼吸速率季节变化范围分别为 0.18~1.05、0.30~2.08、0.50~1.71、0.53~2.78、0.26~1.08、0.39~1.93、0.30~2.27、0.43~1.43、0.39~1.26 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。9 种土地利用类型在植物生长季节内土壤呼吸速率变异系数在 5%~65%之间,土壤呼吸速率季节变化幅度以苜蓿地和荒草地(150%)最大,以撂

荒地(82%)最小。

本研究中裸地、农地、梯田农地、苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地土壤呼吸速率与我们2009年结果^[11]比较发现:本年度除裸地外,其余样地土壤呼吸速率在植物生长季内均低于2009年所测定的数据。这表明土壤呼吸有很高的时间变异。因此,在时间尺度上加强长时段、全年土壤呼吸的野外数据连续测量,在空间格局上加强不同土地利用方式或不同植被类型的比较研究,对于准确估算黄土高原水蚀风蚀交错区区域碳排放及其对中国陆地生态系统碳循环的定量分析具有重要意义。

方差分析结果(表3)表明,同一土地利用方式在不同月份土壤呼吸速率存在显著性差异,不同土地利用方式在6—9月土壤呼吸速率差异明显($P<0.05$)。不同土地利用方式在生长季节内土壤 CO_2 平均释放速率顺序为苜蓿地 $1.57>$ 荒草地 $1.28>$ 农地 $1.26>$ 长

芒草地 $1.15>$ 梯田农地 $1.09>$ 沙蒿地 $1.02>$ 撂荒地 $1.01>$ 沙柳地 $0.97>$ 裸地 0.69 。其中裸地土壤呼吸显著低于其他土地利用类型($P<0.05$),这与裸地内无植物生长有关,说明植被群落的差异与分布格局也是研究区域土壤呼吸速率的决定因子。

各样地土壤呼吸速率月平均值最大出现在7月或8月,10月最小,主要决定因素是土壤水热条件。苜蓿地、农地、荒草地在8月份土壤呼吸速率显著高于其他土地利用方式,原因可能是植物处于生长旺盛期,根系生长迅速,土壤温度和水分条件较好,土壤呼吸剧烈。沙柳地、沙蒿地土壤呼吸速率在7—9月平均值低于除裸地外的其他土地利用方式,主要原因是沙地土壤水分、养分条件较差,这与崔晓勇等^[17]在内蒙古的研究结果一致,也与我们的前期研究结果一致^[5]。

黄土高原水蚀风蚀交错区传统土地退耕还林还草过程为:农地→裸地→人工恢复(草本植被:苜蓿

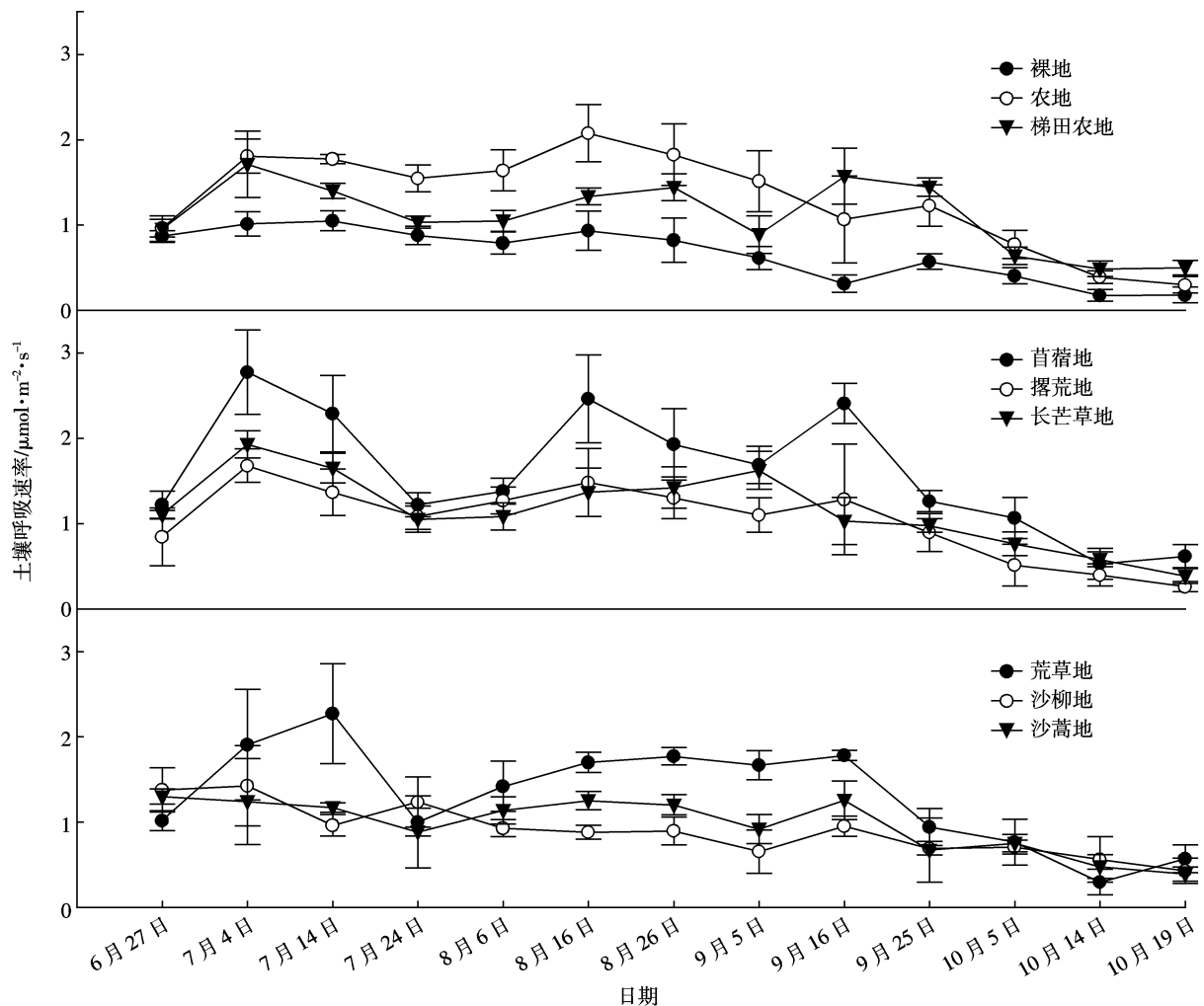


图1 不同土地利用方式下土壤呼吸速率的季节变化

Figure 1 Seasonal dynamic changes of soil respiration rate under different land use patterns

等;灌木:沙柳、柠条、沙打旺等)/自然恢复(撂荒地)→荒地→长芒草地。本研究表明,农地变为人工草地(苜蓿地),土壤呼吸速率提高 25%;农地撂荒以后,土壤呼吸速率降低 23%;农地长时间撂荒逐渐发展为荒地,土壤呼吸速率升高不明显;农地撂荒后植被群落演替为长芒草群落,土壤呼吸速率下降 9%;紫花苜蓿地与裸地比较,土壤呼吸速率显著提高 127%。尽管苜蓿地排放 CO_2 较高,但已有研究表明,苜蓿群落随时间发展最终演替为长芒草群落^[18],从长远的角度看,退耕还林还草等一系列植被恢复与建设措施显著遏制了当地严重的水土流失,使黄土高原北部植被覆盖显著增加^[19],促使农地撂荒以后土壤容重减小,孔隙度增大,有机质含量增加^[20-21]。

2.2 土壤呼吸变化与土壤水热等环境因子相关关系

土壤呼吸速率与温度、水分条件的量化关系是深入了解土壤呼吸主要驱动机制、正确建立相关预测模型的核心^[22]。多数研究表明,土壤呼吸速率的变化受

温度与水分的共同调控^[23]。本研究采用相关分析方法,分别计算了 9 种土地利用方式生长季节内土壤呼吸速率与水、热因子的相关系数(表 4)。9 种土地利用方式下土壤呼吸速率均与气温、15 cm 地温呈显著相关($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$),与 5、10 cm 地温呈极显著相关($P<0.01$),而与 0~6 cm 土壤水分相关性不显著。张丽华等^[12]对于干旱荒漠区不同土地利用类型土壤呼吸速率季节变化研究发现,0~5 cm 土壤含水量与土壤呼吸速率间呈显著的二项式函数关系($P<0.01$),这与本研究得出的结论有所不同。主要是因为本研究区域内试验年份雨季来的相对较晚,同时,土壤湿度不仅依赖于降水,还有蒸发,并表现出受土壤特性、植物生长等影响的高时空变异,这亦会影响土壤 CO_2 释放通量与土壤湿度间的相关性^[24]。土壤呼吸与土壤养分、土壤容重、饱和导水率、孔隙度等因子相关性均未达显著水平。

对黄土高原水蚀风蚀交错区 9 种土地利用方式

表 3 不同土地利用方式土壤呼吸速率季节变化方差分析($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 3 The seasonal variance of soil respiration rate under different land use patterns ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

土地利用	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值
裸地	0.87Ad	0.98Ab	0.85Ae	0.50Bd	0.26Cb	0.69
农地	0.97Bed	1.71Aab	1.85Aa	1.27Babc	0.49Cab	1.26
梯田农地	0.96Acd	1.38Aab	1.28Abcd	1.30Aabc	0.54Bab	1.09
苜蓿地	1.27ABabc	2.14Aa	1.92Aa	1.79Aa	0.74Ba	1.57
撂荒地	0.85Bd	1.38Aab	1.35Abc	1.10ABbcd	0.39Cab	1.01
长芒草地	1.11Aabcd	1.54Aab	1.29Abcd	1.21Aabc	0.58Bab	1.15
荒草地	1.02ABbcd	1.73Aab	1.63Aab	1.47Aab	0.55Bab	1.28
沙柳地	1.38Aa	1.21ABb	0.90BCde	0.77Ccd	0.57Cab	0.97
沙蒿地	1.30Aab	1.10Ab	1.20Acde	0.95Abcd	0.54Bb	1.02

注:表中行内不同大写字母表示同一土地利用方式在不同月的土壤呼吸速率差异显著($P<0.05$),列中不同小写字母表示不同土地利用方式在同一月的土壤呼吸速率差异显著($P<0.05$)。

表 4 不同土地利用方式下土壤呼吸变化与水热因子相关关系

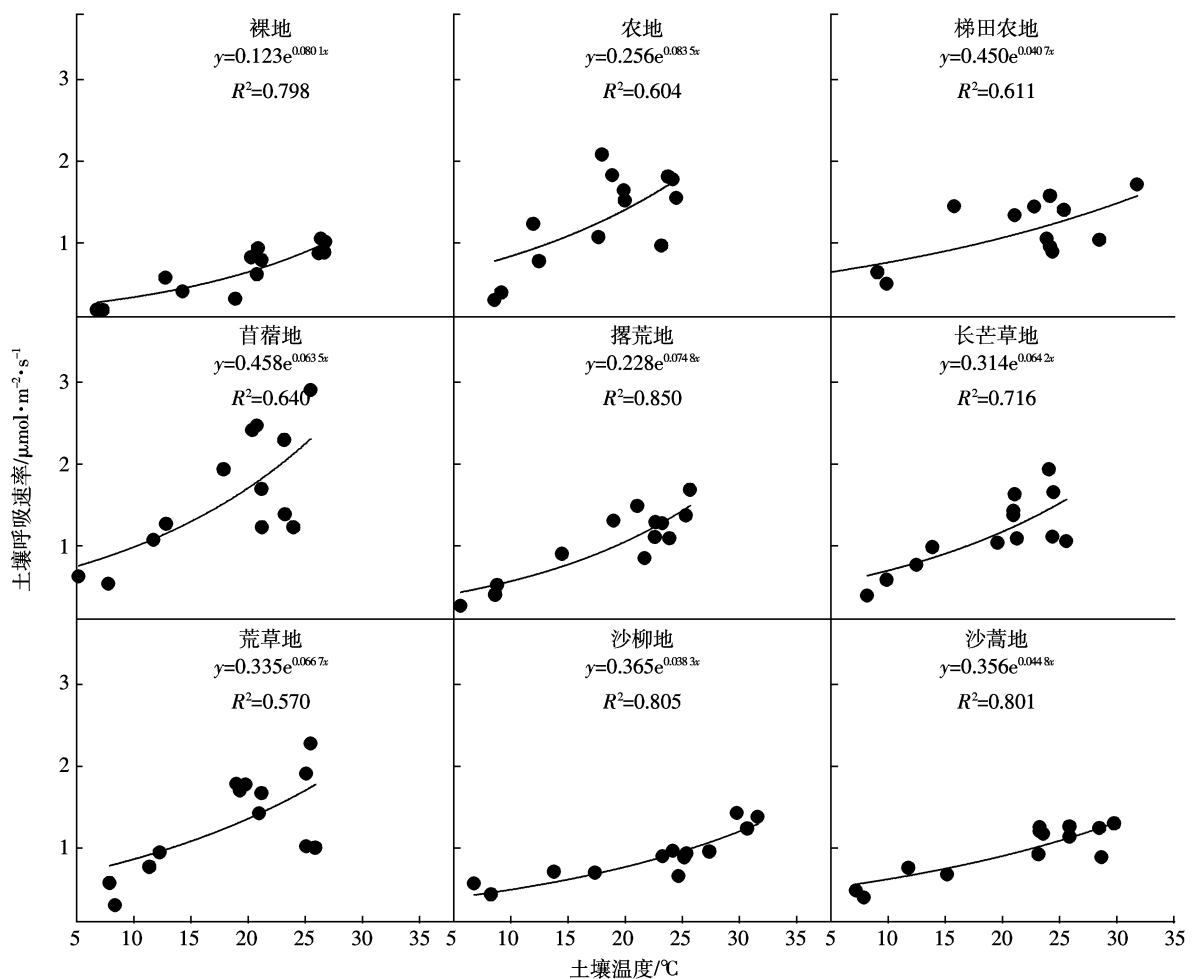
Table 4 Correlation with soil respiration change and hydrothermal factors under different land use patterns

土地利用	气温	5 cm 地温	10 cm 地温	15 cm 地温	0~6 cm 土壤水分
裸地	0.876**	0.892**	0.891**	0.886**	-0.383
农地	0.678**	0.697**	0.718**	0.733**	-0.121
梯田农地	0.715**	0.722**	0.699**	0.642*	-0.195
苜蓿地	0.626*	0.729**	0.698**	0.656*	-0.102
撂荒地	0.735**	0.761**	0.747**	0.733**	0.004
长芒草地	0.638*	0.774**	0.787**	0.783**	0.161
荒草地	0.681**	0.697**	0.714**	0.715**	-0.295
沙柳地	0.838**	0.871**	0.860**	0.843**	-0.563
沙蒿地	0.803**	0.723**	0.856**	0.882**	-0.558

注:* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$ 。

整个生长季节内土壤呼吸与温度数据进行指数函数拟合,结果表明,指数函数决定系数 R^2 均达到显著水平($P<0.05$)。裸地、梯田农地、撂荒地土壤呼吸与土壤表层 5 cm 温度决定系数 R^2 最高;苜蓿地、长芒草地、荒草地、沙柳地以 10 cm 地温决定系数 R^2 最高;农地、沙蒿地以 15 cm 地温决定系数 R^2 最高。9 种土地利用方式(排列顺序为表 4 中顺序)最佳拟合方程中决定系数 R^2 分别 0.798、0.604、0.611、0.640、0.850、0.716、0.570、0.805、0.801,对应的 Q_{10} 值分别为 2.23、2.32、1.51、1.90、2.12、1.90、1.95、1.46、1.57,表现为农地>裸地>撂荒地>荒草地>长芒草地>苜蓿地>沙蒿地>梯田农地>沙柳地,说明在黄土高原水蚀风蚀交错区退耕还林还草能够降低土壤呼吸对温度的敏感性 Q_{10} 值。

陆地生态系统土壤呼吸的 Q_{10} 值变化在 1.3~5.6 之间,这取决于生态系统的类型及其地理分布^[2]。本文的 Q_{10} 值变化范围 1.40~2.48,这与前人的研究结论一致。从 3 个层次的地温对应的 Q_{10} 值来看,9 种土地利用方式均表现为 15 cm 地温>10 cm 地温>5 cm 地温。这与齐玉春等^[13]对内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子的研究结论一致。 Q_{10} 值除了受温度、水分影响外,还受植被类型、物候等影响,随季节而变化^[25]。同时, Q_{10} 值具有温度适应性现象,及高地温环境低 Q_{10} 值和低地温环境高 Q_{10} 值^[2],这与本文的研究规律一致。例如,裸地、农地地温较低,而 Q_{10} 值较高;沙柳地、沙蒿地地温较高, Q_{10} 值较低。此外,沙柳地、沙蒿地 Q_{10} 值较低的另一个原因是土壤质地为沙地,土壤养分条件差,较少的基质



裸地、梯田农地、撂荒地土壤呼吸速率与 5 cm 地温拟合方程最佳;苜蓿地、长芒草地、荒草地、沙柳地土壤呼吸速率与 10 cm 地温拟合方程最佳;农地、沙蒿地土壤呼吸速率与 15 cm 地温拟合方程最佳。

图 2 不同土地利用方式下土壤呼吸速率与温度的拟合关系

Figure 2 The relationship between soil respiration rate and temperature under different land use patterns

的数量与质量影响微生物群落组成出现变化^[26],从而减少土壤中的呼吸量^[27],导致温度对土壤呼吸的敏感性降低。

从图2可以看出,利用指数模拟,温度变化能够分别解释裸地、农地、梯田农地、苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地、沙柳地、沙蒿地土壤呼吸变化的79.8%、60.4%、61.1%、64.0%、85.0%、71.6%、57.0%、80.5%、80.1%。在温度较低时,土壤呼吸点聚集在拟合曲线附近,而高温时呼吸点相对发散。说明低温是土壤呼吸的主要调控因子,土壤呼吸温度敏感性较强,而高温时,土壤呼吸对温度的反应敏感性减弱,其他环境因子(降雨、土壤水分、枯落物等)对土壤呼吸的控制作用增强。

2.3 土壤呼吸变化与植被叶面积指数相关关系

图3为6—10月植物生长季节内土壤呼吸速率变化与其地上植被叶面积指数相互关系。由图3得知,研究区域内土壤呼吸速率与其地上植被叶面积指数呈极显著线性($y=0.433x+0.709$)相关关系,相关系数 $r=0.679(P<0.01)$ 。而通过对每个月份的土壤呼吸速率与植被叶面积指数进行线性回归、相关分析,发现两者在6月、7月、8月、9月均达到显著相关水平($P<0.05$),相关系数分别为0.774、0.738、0.792、0.698;同时发现,10月份两者不存在显著相关关系。原因可能是10月份温度较低,限制了土壤呼吸速率,加之植被枯萎凋落使叶面积指数急剧减小。Reichstein等^[28]使用叶面积指数(LAI)来指示地上植被生产力,发现标准条件下的土壤呼吸(18℃,没有水分限制)和最大LAI之间具有很高的相关性。

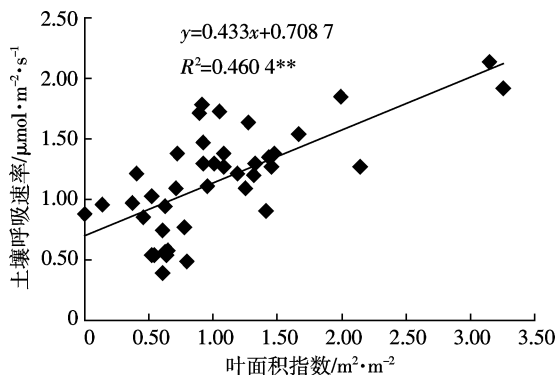


图3 土壤呼吸变化与叶面积指数之间的关系

Figure 3 Relationships between soil respiration changes and leaf area index

2.4 土壤碳收支平衡估算

研究人员在研究陆地生态系统是大气CO₂的

“源”还是“汇”的问题时,提出了净生态系统生产力NEP(Net Ecosystem Productivity)的概念。NEP代表大气CO₂进入生态系统的净光合产量,NEP等于净初级生产力NPP(Net Primary Productivity)减去土壤微生物异养呼吸C释放量(R_m)后的部分(式3)^[29]。如果NEP的值为正,表明该生态系统是大气中净吸收CO₂的“汇”;反之,该生态系统是大气CO₂的“源”^[30],可以用公式描述为:

$$NEP = NPP - R_m = NPP - (R_s - 0.3R_s) \quad (3)$$

沙柳地、沙蒿地为灌木,碳平衡估算容易产生较大偏差,本文选取7种土地利用方式进行土壤碳平衡的估算。研究区植物大多从5月初开始萌芽生长,10月下旬进入休眠期,故本研究中5月到10月植物生长季节地上部与地下部根的生物量作为净初级生产力。从10月下旬到翌年4月初,由于温度较低,土壤呼吸微弱,不计算在土壤释放碳内。此外,所有样地5月土壤呼吸速率通过已测5月气温根据6—10月土壤呼吸速率与气温指数函数模型计算获得。本文假设植物根系呼吸占总呼吸量30%^[31-32]。

6种土地利用方式下碳平衡计算结果如表5所示,植被净初级生产力($NPP/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)大小顺序为苜蓿地11668>荒草地5229>长芒草地4613>撂荒地4349>农地3840>梯田农地3300。苜蓿地净初级生产力固定碳量为4504 $\text{kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别是农地、梯田农地、撂荒地、长芒草地、荒草地的2.7、3.0、2.4、2.3、2.1倍。

本研究中,农地、梯田农地、苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地NEP均为正值,说明植物固定碳量大于土壤呼吸消耗碳量,均属碳“汇”;其中农地、梯田农地表现为弱的碳“汇”,苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地表现为明显的碳“汇”。而裸地NEP为-980 $\text{kgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,因无植物固定碳,处于碳收支失衡状态,而成为碳“源”。农地的耕作活动,如犁地,打破土壤团聚体,使最初在土壤中受到保护的有机质暴露被微生物攻击,因而加速了分解作用和呼吸作用释放到大气中的碳损失^[31]。

3 结论

(1)不同土地利用方式下土壤呼吸速率呈多峰型变化趋势,土地利用方式显著影响了土壤呼吸速率。9种土地利用类型在植物生长季节内土壤呼吸速率变异系数在5%~65%之间;土壤呼吸速率季节变化幅度以苜蓿地和荒草地(150%)最大,以撂荒地(82%)最

表 5 研究区 7 种土地利用方式下土壤碳平衡

Table 5 Carbon balance under seven land use patterns at the study site

项目	裸地	农地	梯田农地	苜蓿地	撂荒地	长芒草地	荒草地
地上部生物量/kg·hm ⁻²	0	3 400	3 000	4 667	2 558	2 428	2 377
地上部含碳量/%	0	47	47	47	48	48	47
地下部生物量/kg·hm ⁻²	0	340	300	7 001	1 791	2 185	2 852
地下部含碳量/%	0	25	25	33	38	36	35
净初级生产力 NPP/kg·hm ⁻²	0	3 840	3 300	11 668	4 349	4 613	5 229
净初级生产力固碳量/kg C·hm ⁻²	0	1 683	1 485	4 504	1 908	1 952	2 116
土壤碳释放总量 R _t /kg C·hm ⁻² ·a ⁻¹	1 400	2 221	1 963	2 745	1 841	2 047	2 252
异养呼吸碳释放量 R _m /kg C·hm ⁻² ·a ⁻¹	980	1 555	1 374	1 922	1 289	1 433	1 577
净生态系统生产力 NEP/kg C·hm ⁻² ·a ⁻¹	-980	128	111	2 582	619	519	539

小。同一土地利用方式在不同月份土壤呼吸速率存在显著性差异,不同土地利用方式在 6—9 月土壤呼吸速率差异明显($P<0.05$)。

(2)9 种土地利用方式下土壤呼吸速率均与气温、土壤温度呈显著相关($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$),而与 0~6 cm 土壤水分相关性不显著。土壤呼吸对较深层土壤温度敏感性较高。研究区域内土壤呼吸速率与其地上植被叶面积指数呈极显著线性($y=0.433x+0.709$)相关关系,相关系数 $r=0.679$ ($P<0.01$)。

(3)植被净初级生产力(NPP)从大到小顺序为:苜蓿、荒草地、长芒草地、撂荒地、农地、梯田农地。除裸地表现为碳“源”外;农地、梯田农地表现为弱的碳“汇”,苜蓿地、撂荒地、长芒草地、荒草地表现为明显的碳“汇”。

参考文献:

- [1] 侯琳,雷瑞德,王得祥,等.森林生态系统土壤呼吸研究进展[J].土壤通报,2006,37(3):589-595.
HOU Lin, LEI Rui-de, WANG De-xiang, et al. A review of soil respiration in forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):589-595.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Ser B*, 1992, 44:81-99.
- [3] Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate forest in the global CO₂ balance[J]. *Air Waste Manage Assoc*, 1991, 41:798-807.
- [4] Marland G, Boden T A, Andres R J, et al. Global regional and national CO₂ emissions/trends a compendium of data on global change carbon dioxide information analysis center, Oak Ridge national laboratory, US department of energy, Oak Ridge. Tennessee, 2000.
- [5] 齐丽彬,樊军,邵明安,等.黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及其环境驱动分析[J].生态学报,2008,28(12):1-9.
QI Li-bin, FAN Jun, SHAO Ming-an, et al. Seasonal changes in soil respiration under different land use patterns in the water wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12):1-9.
- [6] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997,17(5):469-476.
LIU Shao-hui, FANG Jing-yun. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5):469-476.
- [7] Badia D V, Alcaniz J M. Basal and specific microbial respiration in semiarid agricultural soils: Organic amendment and irrigation management effects[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1993, 11(3):261-274.
- [8] Chagas C I, et al. Tillage and cropping effects on selected properties of an argiudoll in Argentina[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26(5-6):643-655.
- [9] Armentano T V, Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil wetlands of the temperate zone[J]. *J Ecol*, 1986, 74:755-774.
- [10] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):71-90.
- [11] 谢慧慧,樊军,齐丽彬,等.黄土高原水蚀风蚀交错带典型植被下土壤呼吸季节变化特征与影响因素[J].环境科学,2010,31(12):2995-3003.
XIE Hui-hui, FAN Jun, QI Li-bin, et al. Seasonal characteristics of soil respiration and affecting factors under typical vegetations in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12):2995-3003.
- [12] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等.干旱荒漠区不同土地利用/覆盖类型土壤呼吸速率的季节变化[J].中国科学 D 辑,2006,36(增刊):68-76.
ZHANG Li-hua, CHEN Ya-ning, LI Wei-hong, et al. Seasonal variation of soil respiration under different land use /vegetation cover types in arid desert area[J]. *Science in China, Ser. D*, 2006, 36(suppl. II):68-76.
- [13] 齐玉春,董云社,刘立新,等.内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子[J].中国科学:地球科学,2010,40(3):341-351.
QI Yu-chun, DONG Yun-she, LIU Li-xin, et al. Spatial-temporal variation in soil respiration and its controlling factors in three steppes of *Stipa L.* in Inner Mongolia, China[J]. *Science in China, Ser. D*, 2010,

- 40(3):341-351.
- [14] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究[J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2004, 34(增刊 II): 167-174.
SHA Li-qing, ZHENG Zheng, TANG Jian-wei, et al. Study on soil respiration of tropical rain forest in Xishuangbanna[J]. *Science in China, Ser. D*, 2004, 34(suppl. II): 167-174.
- [15] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.
CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 831-836.
- [16] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, et al. Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(6): 887-893.
- [17] 崔骁勇, 王艳芬, 杜占迟, 等. 内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸初步研究[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 245-251.
CUI Xiao-yong, WANG Yan-fen, DU Zhan-chi, et al. Primary study on soil respiration of main plant communities in typical grasslands in Inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1999, 7(3): 245-251.
- [18] 王建国, 樊军, 王全九, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被地上生物量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 556-564.
WANG Jian-guo, FAN Jun, WANG Quan-jiu, et al. Vegetation above-ground biomass and its influencing factors in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 556-564.
- [19] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应[J]. 自然科学进展, 2007, 17(6): 770-778.
XIN Zhong-bao, XU Jiong-xin. Spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Loess Plateau and its response to climate change[J]. *Progress in Nature Science*, 2007, 17(6): 770-778.
- [20] 李裕元, 邵明安, 郑继勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2279-2287.
LI Yu-yuan, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong, et al. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [21] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
PENG Wen-ying, ZHANG Ke-li, CHEN Yao, et al. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the loess sloping cropping[J]. *Journal of Natural Resource*, 2005, 20(2): 272-278.
- [22] Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. *Glob Change Biol*, 2004, 10: 161-169.
- [23] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1537-1542.
ZHANG Jin-bo, SONG Chang-chun, YANG Wen-yan. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1537-1542.
- [24] Singh J S, Milchunas D G, Lauenroth W K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semi-arid grassland[J]. *Plant Ecology*, 1998, 134: 77-89.
- [25] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, 396: 570-572.
- [26] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [27] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming[J]. *New Phytologist*, 2000, 147: 141-154.
- [28] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4), 1104 doi: 10. 1029/2003GB002035.
- [29] Woodwell G M, et al. The biota and the world carbon budget[J]. *Science*, 1978, 199: 141-146.
- [30] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156-160.
HUANG Bin, WANG Jing-guo, GONG Yuan-shi, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 156-160.
- [31] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 19-20.
LUO Yi-qi, ZHOU Xu-hui. Soil respiration and the environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 19-20.
- [32] 李凌浩, 陈左忠. 草地群落的土壤呼吸[J]. 生态学杂志, 1998, 17(4): 45-51.
LI Ling-hao, CHEN Zuo-zhong. Soil respiration in grassland communities in the world[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 45-51.