

半干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸特征

高金芳, 周波, 马涛, 张峰, 董彦丽, 王彦武, 于惠

(甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020)

摘要:采用动态密闭气室红外 CO₂ 分析法测定了盐碱地、撂荒地和苜蓿地三种土地利用方式下的土壤呼吸速率,并结合水热因子,对不同土地利用方式下土壤呼吸速率的差异性以及其和温度、含水量之间的关系进行了分析。结果表明:三种土地利用类型土壤呼吸速率日变化均呈现单峰型曲线,与气温变化趋势一致,一天中气温最高时的土壤呼吸速率均显著高于其他时间;不同土地利用方式土壤呼吸与水热因子均呈正相关,采用线性关系式来分析土壤呼吸速率与土壤水分含量的关系。不同土地利用方式下土壤呼吸速率与近地面气温、不同深度土壤温度的关系可以用指数方程得到较好的拟合($p < 0.05$),撂荒地土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 值变化较大,从而对土壤温度的响应更为敏感,且不同深度土壤的 Q_{10} 值存在较大差异,盐碱地和苜蓿地不同土层的 Q_{10} 值均在 2.0 左右变化,与全球 Q_{10} 的平均水平接近。盐碱地、撂荒地和苜蓿地土壤呼吸与土壤温度和湿度的双变量模型关系显著,比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异。

关键词:土地利用方式;土壤呼吸;盐碱地;半干旱区

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0089-05

Soil Respiration Characteristics Under Different Land Use Patterns in Semi-arid Area

GAO Jinfang, ZHOU Bo, MA Tao, ZHANG Feng, DONG Yanli, WANG Yanwu, YU Hui

(Gansu Science Institute of Soil and Water Conservation, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Soil respiration rates under the saline land, abandoned land and *Medicago sativa* land were measured by the closed-IRGA infrared CO₂ method, the differences in soil respiration in different land use patterns and the relationships between soil respiration, soil temperature and soil moisture were analyzed. The results showed that diurnal changes of soil respiration presented single peak curves and the changes of air temperature followed a similar trend, the soil respiration reached the maximum values when the soil temperature was close to the maximum; there were positive correlations between soil respiration and soil moisture, soil temperature under different land use patterns, the relationship between soil respiration and soil moisture content was linear. The exponential equation could present the relationship between soil respiration and near-surface air temperature, soil temperature at different depths better ($p < 0.05$), the significant variation of the Q_{10} of soil respiration of abandoned land was observed, illustrating that the soil respiration was more sensitive to soil temperature, the values of Q_{10} were significantly different in different soil depths; the values of Q_{10} in saline land and *Medicago sativa* land at different soil depths were around 2.0, which was closed to the global average value. A two-variable soil respiration model (soil temperature and soil moisture) could explain the variations of soil respiration much better than mono-variable model under saline land, abandoned land and *Medicago sativa* land.

Keywords: land use patterns; soil respiration; saline land; semi-arid area

土壤呼吸是一个受多种因素综合影响的复杂的 CO₂ 排放过程,土地利用方式的改变极大的影响着

土壤呼吸,它改变了植被覆盖、根系分布、主要的环境因素和土壤特性,植被覆盖的改变可以影响到土壤表

收稿日期:2016-05-06

修回日期:2016-08-02

资助项目:甘肃省水利重点科研计划项目(2013-293);水利部“948”项目(201522);甘肃省自然科学基金资助项目(1506RJZA176);甘肃省青年科技资助项目(1506RJYA177);甘肃省水利重点科研计划项目(2014-223-6)

第一作者:高金芳(1982—),女,甘肃靖远县人,硕士,工程师,主要从事水土保持研究。E-mail:317660806@qq.com

层的能量平衡,也对近地层的空气相对湿度产生影响^[1],因为土壤水分、根系生物量、微生物数量或者凋落物量随着距离植株的远近而发生变化。在植物根系作用下的土壤性质的改变,一方面反作用于植物根系,另一方面对土壤微生物也产生极大的影响,这些都会强烈影响到土壤呼吸^[2-3]。另外,不同土地利用方式所引起的土壤有机物含量及有机物稳定性、质量和生物多样性等也会影响到土壤呼吸速率。

土地利用方式通过对土壤孔隙度、土壤湿度和土壤肥力的直接影响而间接地调控土壤呼吸作用。目前,关于半干旱区土壤呼吸特征有大量报道,齐丽彬等^[4]研究了黄土高原5种土地利用方式的土壤呼吸速率与水热因子的关系,土壤呼吸与土壤温度呈正相关关系,土壤呼吸的双变量模型关系显著,比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异;付微等^[5]研究黄土高原水蚀风蚀交错带指出,土壤呼吸与土壤温度呈现显著指数函数关系,每种灌木林地黄绵土土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 高于风沙土,从而对土壤温度的响应更为敏感。高会议等^[6]认为,土壤呼吸与土壤温度具有极显著的正相关关系,可以用指数函数拟合,水分对土壤呼吸的影响复杂。裸地土壤呼吸的双变量模型关系显著,比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异。Bouma^[7]通过对粉粒、砂粒和黏粒含量不同的土壤进行土壤呼吸对比试验研究,发现通常情况下,土壤质地对土壤呼吸几乎没有影响,但在灌水处理后,细质土的土壤呼吸过程比砂土受到较强的制约。然而,有关土壤呼吸对土地利用方式响应方面的研究较少,盐碱地土壤呼吸与水热因子的关系鲜见报道。本研究在半干旱地区,选择不同土地利用方式下的盐碱地、撂荒地和苜蓿地为研究对象,利用便携式 CO_2 分析仪对不同土地利用方式下土壤呼吸进行了24 h的野外对比研究,分析不同土地利用方式下土壤呼吸之间的差异,阐明土壤呼吸的动态变化及其对土壤温度的敏感性,初步探讨该地区土壤呼吸对不同土地利用方式的响应机制,力求为该地区半干旱生态系统碳循环过程的深入研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地选择与试验设计

研究区位于甘肃省兰州市小青山($103^{\circ}56'37''\text{E}$, $36^{\circ}01'40''\text{N}$),海拔1 724 m。该区属于黄土丘陵沟壑区第五副区,地貌特征以梁状黄土丘陵为主,为北温带半干旱大陆性气候,四季分明,夏无酷暑,冬无极寒。年降水量为329.7 mm,蒸发量为1 377.2 mm,

年平均气温 6.6°C ,大于等于 10°C 的有效活动积温为1 200~3 200 $^{\circ}\text{C}$,年均日照时数2 666 h,太阳辐射量为130.57 kJ/cm^2 ,无霜期为85~148 d。土壤为黄土母质上发育起来的灰钙土,有机质含量0.5%~1.5%左右,pH值为8~9,土壤容重为1.1~1.4 g/cm^3 。本研究选取该区三种土地利用方式,其中盐碱地为覆膜滴灌试验用地,当年种植作物为玉米,种植前经过处理,土壤较为疏松,种植密度为3 000株/666.7 m^2 ,土壤平均pH值为11.24;撂荒地弃耕五年,坡向朝东,坡度 $<5^{\circ}$,坡面分布零星杂草(白沙蒿、冰草),测定基座布置在无植物生长的空地;苜蓿地为种植苜蓿7 a,覆盖率为80%以上。盐碱地和撂荒地的表层土壤养分之间具有一定的差异性。其中盐碱地(0.57 g/kg)与撂荒地(4.04 g/kg)和苜蓿地(5.84 g/kg)土壤全氮含量差别较大,盐碱地的土壤养分较差。

1.2 测定方法

土壤呼吸速率观测在2015年10月18日—20日进行,土壤呼吸速率测定采用土壤 CO_2 通量自动测定系统,测定仪器型号为LI-8100(USA),测定前在每个样地内安置测定基座(去除基座内的地表植物),为了减少安置测定基座对土壤系统的破坏,在测定基座安置24 h后再进行测定,从而避免了由于安置气室基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动。以24 h为1周期,每间隔2~3 h测定1次土壤呼吸,每个样地设置两个重复,每个土壤隔离环重复测定3次,取平均值,以获取土壤呼吸日变化动态。在进行土壤呼吸测定的同时,利用曲管温度计测量5,10 cm深度土壤温度;用LI-8100便携式 CO_2 分析仪自带土壤水分计插入各小样方内土壤隔离环的周围,来测定的土壤体积含水量,每次测定3次重复。气温数据由研究区内全自动气象站获取。

1.3 试验数据处理

数据分析采用Excel 2007和SPSS 18.0统计分析软件分析作图。用SPSS统计软件检验不同土地利用方式土壤呼吸变化差异显著性,应用SPSS软件统计分析土壤呼吸与温度和水分之间的关系,建立土壤呼吸与温度和湿度的指数模型,动态曲线采用Excel 2007绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸日变化特征

2.1.1 土壤呼吸日变化动态 不同土地利用方式土壤呼吸的日变化呈单峰趋势(图1),盐碱地土壤呼吸峰值1.24 $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在15:00,最低值0.34 $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在05:00;撂荒地土壤

呼吸峰值 $0.60 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在 15:00,最低值 $0.02 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在 05:00;苜蓿地土壤呼吸峰值 $1.21 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在 13:00,最低值 $0.29 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在 7:00。盐碱地、撂荒地和苜蓿地土壤呼吸速率昼夜变化幅度分别为 122.42%,199.83%,130.03%,土壤呼吸昼夜变化较大,均在 120% 以上。

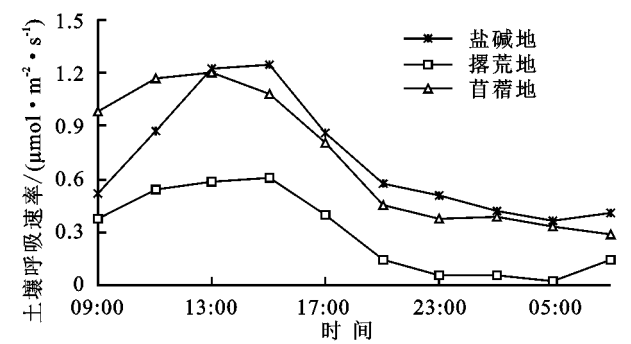


图 1 不同土地利用方式土壤呼吸速率日变化

2.1.2 土壤呼吸日变化与温度的关系 不同土地利用方式下土壤呼吸的日变化趋势与近地面温度和地温变化格局一致,一天中土壤呼吸速率极值出现的时间与近地面气温和地温变化极值出现的时间具有较高的一致性(图 2)。盐碱地的近地面温度高于 5 cm 地温,与撂荒地和苜蓿地的相反,可能由于盐碱地的土壤含水量为撂荒地和苜蓿地的 5 倍,土壤水分对地温有控制作用。盐碱地、撂荒地和苜蓿地近地面温度昼夜变化分别为 87.03%,171.79%和 169.45%,表明土壤呼吸的昼夜变化不仅受外界温度条件的影响,还受到植物生长状态和水分等因素的影响。土壤呼吸是很多生物因素和环境因素影响的复杂过程,这些影响因素具有很大的时空变异,由此而造成土壤呼吸变异性增大。

2.2 土壤呼吸速率与环境因素的关系

2.2.1 土壤呼吸速率与土壤湿度 在不同土地利用方式下,首先比较检验土壤呼吸速率(R)与土壤水分(W)的相关性(表 1),以验证模型的可行性,表 1 结果显示:不同土地利用方式土壤呼吸与水热因子均呈正相关,与高艳红等人的研究结果一致^[8]。盐碱地土壤呼吸与土壤水分的相关性均较好,撂荒地和苜蓿地土壤水分对土壤呼吸速率表现不明显;这是因为在较适宜的水分条件下,并不足以影响微生物和植物根系的活 动,则很难明显地测出水分对土壤呼吸的影响,此时土壤水分的影响很可能被其他因子的影响所掩盖^[9]。

采用线性关系式来分析土壤呼吸速率与土壤水分含量的关系。发现只有盐碱地土壤水分对土壤呼吸速率的影响达到显著性水平($p<0.05$),撂荒地和苜蓿地土壤水分对土壤呼吸速率表现不明显(表 2),

盐碱地土壤水分对土壤呼吸变化的解释能力为 56.21%~57.33%。

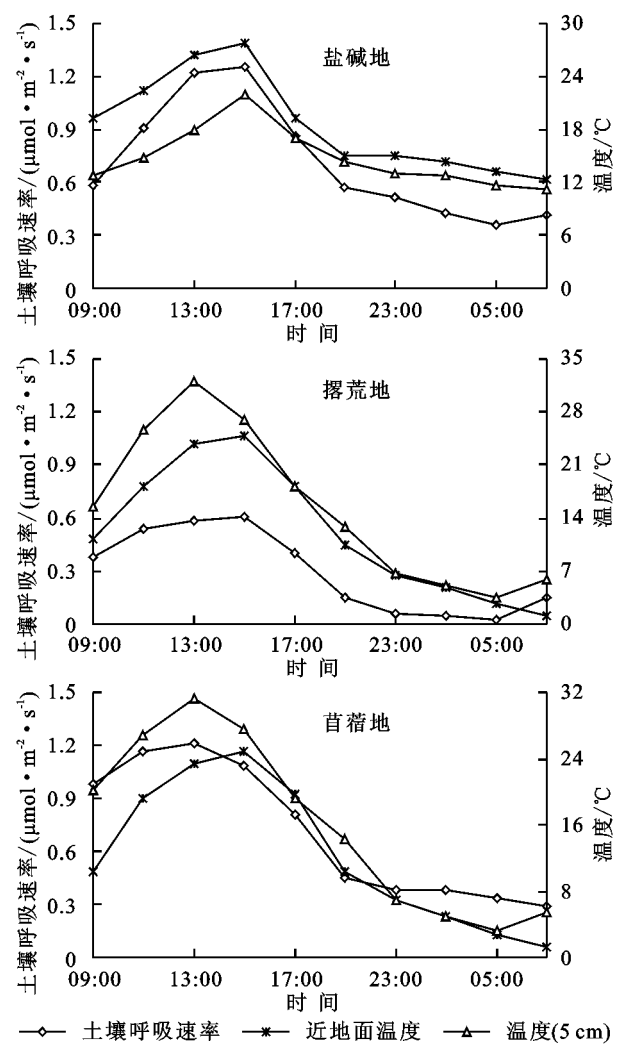


图 2 不同土地利用方式土壤呼吸速率、温度日变化

表 1 不同土地利用方式土壤呼吸速率(R)与土壤温度(T)和土壤水分(W)的相关性

处理	T_a	$T_{0\text{ cm}}$	$T_{5\text{ cm}}$	$T_{10\text{ cm}}$	$W_{5\text{ cm}}$	$W_{10\text{ cm}}$
盐碱地	0.841**	0.950**	0.898**	0.703*	0.752*	0.760*
撂荒地	0.977**	0.932**	0.966**	0.952**	0.543	0.495
苜蓿地	0.907**	0.890**	0.969**	0.908**	0.546	0.574

注: ** 在 0.01 水平上显著相关, * 在 0.05 水平上显著相关。

2.2.2 土壤呼吸速率与温度 由表 1 看出,不同土地利用方式下土壤呼吸速率(R)与温度(T)显著相关,土壤温度要比土壤水分对土壤呼吸作用的影响更明显,在土壤呼吸与所有温度指标之间的关系中,盐碱地与近地面温度的相关性最好,与 5 cm 土壤温度相关性也达到显著水平,土壤呼吸主要发生在土壤表层;撂荒地土壤 5 cm 地温和大气温度的相关性最好,与近地面温度和 10 cm 土壤温度相关性也达到显著水平;苜蓿地与土壤 5 cm 地温的相关性最好,与 10 cm 土壤温度相关性也达到显著水平,但与近地面

温度和大气温度相关性较差,很可能是由于苜蓿地植被覆盖度大,其地表温度不易受外界影响造成土壤呼吸与其极显著相关。不同土地利用方式下的土壤呼吸与温度均达到显著相关($p < 0.05$)。

土壤呼吸对温度的响应较为敏感,一般认为温度升高,促进植物根系呼吸、土壤微生物活动,土壤呼吸因而增强。本研究中,采用指数方程模型($R = ae^{bT}$)分析土壤呼吸与温度的关系,与多数学者的研究基本一致^[10-12]。研究发现,不同土地利用方式下土壤呼吸速率与近地面气温、不同深度土壤温度的关系可以用指数方程得到较好的拟合($p < 0.05$)(表 2)。盐碱地和撂荒地土壤呼吸速率与近地面气温指数相

关最好,苜蓿地土壤呼吸速率与 5 cm 地温指数相关最好。

为与其他相关研究对比分析温度敏感性指数 Q_{10} ,本文对土壤呼吸速率与近地面气温、5 cm 和 10 cm 土壤温度进行指数关系分析,结果见表 2。可以看出,不同土地利用方式下土壤呼吸的 Q_{10} 随着土层深度的增加而增加,这主要是由于随着土层深度的增加土壤温度的变化幅度减少而造成的。随着温度的升高,撂荒地 Q_{10} 值的变化较大,土壤呼吸对土壤温度的响应更为敏感,且不同深度土壤的 Q_{10} 值存在较大差异。盐碱地和苜蓿地不同土层的 Q_{10} 值均在 2.0 左右变化,与全球 Q_{10} 的平均水平接近^[13]。

表 2 不同土地利用方式土壤呼吸速率与土壤温度和土壤水分的关系

处理	关系式	$R^2_{\text{温度}}$	Q_{10}	关系式	$R^2_{\text{水分}}$
盐碱地近地面气温	$R = 0.1668e^{0.0723T}$	0.8639	2.0606		
盐碱地土层深度(5 cm)	$R = 0.1556e^{0.0969T}$	0.7293	2.6353	$R = 8.026W - 0.7437$	0.5621*
盐碱地土层深度(10 cm)	$R = 0.1506e^{0.1046T}$	0.4897	2.8462	$R = 7.7898W - 0.7308$	0.5733*
撂荒地近地面气温	$R = 0.0428e^{0.1074T}$	0.7155	2.9271		
撂荒地土层深度(5 cm)	$R = 0.0328e^{0.099T}$	0.7043	2.6912	$R = 14.914W - 0.7242$	0.2995
撂荒地土层深度(10 cm)	$R = 0.0194e^{0.1598T}$	0.6934	4.9431	$R = 8.6652W - 0.3382$	0.3435
苜蓿地近地面气温	$R = 0.2925e^{0.0599T}$	0.8195	1.8203		
苜蓿地土层深度(5 cm)	$R = 0.2615e^{0.0532T}$	0.9318	1.7023	$R = 14.317W - 0.0229$	0.2975
苜蓿地土层深度(10 cm)	$R = 0.1839e^{0.0846T}$	0.8532	2.3303	$R = 16.162W - 0.2465$	0.3304

2.2.3 土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度 实际上,土壤温度总是和土壤水分一起对呼吸速率的变化产生影响,两者之间存在明显的交互作用。本研究采用以下模型描述土壤水分和温度对土壤呼吸变化的影响。

$$R = ae^{bT}W^c$$

式中: R 为土壤呼吸速率; T 为土壤温度; W 为土壤水分含量; a, b, c 为常数。

本文利用 5, 10 cm 深度土层的土壤温度和土壤体积含水量与土壤呼吸依据公式 $R = ae^{bT}W^c$, 建立了土壤呼吸速率与土壤温度和水分的双变量关系(表 3)。

与单因子模型相比,复合模型的决定系数(R^2)均显著提高,盐碱地复合模型的决定系数随土层深度的增加而减小,5 cm 土层水分和土壤温度复合模型的决定系数最大(表 3),表明 0—10 cm 土壤温度和水分的变化能够解释 91.85% 的土壤呼吸变异;撂荒地复合模型的决定系数随土层深度的增加而减小,5 cm 土层水分和土壤温度复合模型的决定系数最大,表明 0—10 cm 土壤温度和水分的变化能够解释 86.25% 的土壤呼吸变异;苜蓿地复合模型的决定系数随土层深度的增加而减小,5 cm 土层水分和土壤温度复合模型的决定系数最大,表明 0—10 cm 土壤温度和水分的变化能够解释 88.0% 的土壤呼吸变异。

表 3 不同土地利用方式土壤呼吸速率与土壤温度和土壤水分的双变量模型

处理	关系式	R^2
盐碱地土层深度(5 cm)	$R = 11.684e^{0.049TW} 2.123$	0.930
盐碱地土层深度(10 cm)	$R = 52.114e^{0.20TW} 2.785$	0.907
撂荒地土层深度(5 cm)	$R = 0.004e^{0.057TW} - 1.021$	0.870
撂荒地土层深度(10 cm)	$R = 0.059e^{0.101TW} - 0.019$	0.855
苜蓿地土层深度(5 cm)	$R = 0.128e^{0.052TW} - 0.25$	0.948
苜蓿地土层深度(10 cm)	$R = 0.099e^{0.065TW} - 0.343$	0.812

3 结论

(1) 不同土地利用方式土壤呼吸的日变化均呈单峰趋势,一天中气温最高时的土壤呼吸速率均显著高于其他时间;土壤呼吸速率极值出现的时间与近地面气温和地温变化极值出现的时间具有较高的一致性。

(2) 不同土地利用方式土壤呼吸与水热因子均呈正相关,采用线性关系式来分析土壤呼吸速率与土壤水分含量的关系。盐碱地土壤水分对土壤呼吸速率的影响达到显著性水平($p < 0.05$),盐碱地土壤水分对土壤呼吸变化的解释能力为 56.21%~57.33%,撂荒地和苜蓿地土壤水分对土壤呼吸速率表现不明显;不同土地利用方式下的土壤呼吸与温度均达到显著相关($p < 0.05$),不同土地利用方式下土壤呼吸速率与近地面气温、不同深度土壤温度的关系可以用指数方程

得到较好的拟合($p < 0.05$)。撂荒地土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 值变化较大,从而对土壤温度的响应更为敏感,且不同深度土壤的 Q_{10} 值存在较大差异。盐碱地和苜蓿地不同土层的 Q_{10} 值均在 2.0 左右变化,与全球 Q_{10} 的平均水平接近。

(3) 土壤温度总是和土壤水分一起对呼吸速率的变化产生影响,两者之间存在明显的交互作用,建立了不同土地利用方式下土壤呼吸速率与土壤温度和水分的双变量关系,比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异,盐碱地、撂荒地和苜蓿地双变量模型能够解释 91.85%,86.25%和 88.0%的土壤呼吸变异。

参考文献:

- [1] 韩广轩,周广胜,许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报,2008,32(3):719-733.
- [2] 马景永,张玉珍,周波,等. 黄土高原不同林龄刺槐林土壤呼吸研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):98-104.
- [3] 骆亦其,周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [4] 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[J]. 生态学报,2008,28(11):5428-5436.
- [5] 付微,黄明斌,邵明安,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同立地条件下土壤呼吸特征[J]. 农业工程学报,2013,29(13):74-80.
- [6] 高会议,郭胜利,刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. 生态学报,2011,31(18):5217-5224.
- [7] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: interactions with soil moisture contents and soil CO_2 concentrations[J]. Plant and Soil, 2000,227(1/2):215-221.
- [8] 高艳红,张志山,刘立超,等. 水热因子对沙漠地区土壤呼吸的影响[J]. 生态学报,2009,29(11):5995-6001.
- [9] 周非飞,林波,刘庆. 青藏高原东缘亚高山针叶林人工恢复过程中的土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报,2009,20(8):1783-1790.
- [10] Townsend A R, Vitousek P M, Holland E A. Tropical soils could dominate the short-term carbon cycle feedbacks to increased global temperatures[J]. Climatic Change, 1992,22(4):293-303.
- [11] 李志刚,侯扶江. 黄土高原不同地形封育草地的土壤呼吸日动态与影响因子分析[J]. 草业学报,2010,19(1):42-49.
- [12] 李英臣,侯翠翠,李小宇,等. 不同秸秆还田方式对黄土高原坡耕地土壤呼吸的影响[J]. 水土保持研究,2015,22(5):122-126.
- [13] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

(上接第 88 页)

- [19] 郭进,文安邦,严冬春,等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J]. 水土保持学报,2012,26(3):18-21.
- [20] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I Theory [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55(5):1231-1238.
- [21] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985,54(12):1325.
- [22] 梁士楚,董鸣,王伯荪,等. 英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征[J]. 应用生态学报,2003,14(1):11-14.
- [23] 韦杰,鲍玉海,金慧芳,等. 三峡库区坡耕地有限顺坡耕作模式及减蚀效应[J]. 灌溉排水学报,2012,31(6):45-48.
- [24] Nair K R. An introduction to agro-forestry [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1993.
- [25] 周萍,文安邦,张信宝,等. 植物固结地埂的水土保持功能探析[J]. 人民长江,2012,43(7):81-84.
- [26] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(2):362-369.
- [27] 张保华,何毓蓉,周红艺. 长江上游典型区亚高山不同林型土壤的结构性与水分效应[J]. 水土保持学报,2002,16(4):127-129.
- [28] 张季如,朱瑞庚,祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J]. 水利学报,2004(4):67-71.
- [29] 廖尔华,张世熔,邓良基,等. 丘陵区土壤颗粒的分形维数及其应用[J]. 四川农业大学学报,2002,20(3):242-245.
- [30] 谢均强,史东梅,张兵,等. 紫色丘陵坡地不同用地类型土壤理化特征分析[J]. 西南大学学报:自然科学版,2008,30(9):108-112.
- [31] 董莉丽,郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):35-41.