

保护性耕作对黄土旱塬箭筈豌豆地土壤呼吸的影响

杜珊珊^{1,2}, 杨倩^{1,2}, 张清平^{1,2}, 王涛^{1,2}, 沈禹颖^{1,2}

(1. 草地农业系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: [目的] 揭示保护性耕作对土壤呼吸的影响, 为旱区保护性农业的发展提供理论依据。[方法] 采用多通道土壤碳通量系统监测传统耕作(T)、传统耕作+秸秆覆盖(TS)、免耕(NT)和免耕+秸秆覆盖(NTS)下箭筈豌豆(*Vicia sativa*)地的土壤呼吸速率。[结果] 各措施下花期呼吸速率比收获期高 10.45%~45.09%, NTS 处理下土壤呼吸速率最低别比 TS、NT 和 T 处理显著减少 39.17%、21.37% 和 30.25% ($p < 0.01$)。耕作处理(T、TS)下日均土壤呼吸速率高于免耕处理(NT、NTS) ($p > 0.05$)。晴天土壤呼吸变化呈单峰曲线, 最大值出现在 14:00。耕作下土壤呼吸速率与气温显著线性相关, 免耕下(NT、NTS)与气温呈指数关系 ($p < 0.01$)。不同耕作措施间气温敏感性 Q_{10} 值大小依次为: T(1.97) > NT(1.62) > TS(1.58) > NTS(1.52)。[结论] 免耕加秸秆还田处理对减少温室气体排放有一定的贡献。

关键词: 保护性耕作; 箭筈豌豆; 土壤呼吸; 大气温度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0144-05

中图分类号: S154.4

Effects of Conservation Tillage on Soil Respiration in Vetch Field in Rain-fed Loessial Tablelands

DU Shanshan^{1,2}, YANG Qian^{1,2}, ZHANG Qingping^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, SHEN Yuying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Agro-ecosystems, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. College of Pastoral and Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: [Objective] The effects of conservation tillage on soil respiration were researched to provide a theoretical basis for the development of conservation agriculture in arid area. [Methods] Soil respiration rate was carried out using multi-channel soil carbon flux measurement system instrument. Tillage treatments were: conventional tillage(T), conventional tillage with stubble retention(TS), no tillage(NT) and no tillage with stubble retention(NTS). [Results] Respiration rate in flowering period was 10.45%~45.09% higher than that in harvest period for all tillage measures. In comparison with TS, NT and T treatment, NTS treatment significantly reduced soil C emission with the percentages of 39.17%, 21.37% and 30.25%, respectively ($p < 0.01$). Soil respiration at sunny day presented an stubble unimodal curve with the peak value at 14:00. The averaged daily soil respiration rates under the two tillage treatments were high but not insignificant than that under the two no-tillage treatments. Under tillage treatments(T, TS), a significant linear correlation was found between soil respiration rate and air temperature; under the no-tillage treatment(NT, NTS), they had a significant exponential relationship ($p < 0.01$). Q_{10} values, namely the atmospheric temperature sensitivity under the four tillage treatments had a rank of T(1.97) > NT(1.62) > TS(1.58) > NTS(1.52). [Conclusion] Conservation tillage as the no tillage with stubble retention (NTS) has its contribution to the reduction of greenhouse gas emissions.

Keywords: conservation tillage; vetch; soil respiration; atmospheric temperature

土壤呼吸指土壤向大气排放 CO₂ 的过程, 是土壤有机碳输出的主要形式^[1], 主要包括植物根系呼吸、微生物呼吸、土壤动物呼吸和土壤含碳物质化学

氧化释放 CO₂^[2] 等过程。土壤呼吸作为影响大气中 CO₂ 浓度的一个重要因素, 已经成为当今研究全球气候变暖的一个热点问题。土壤呼吸的变化主要受

收稿日期: 2014-08-28

修回日期: 2014-09-25

资助项目: 科技部科技支撑项目“西部城郊生态涵养高效农业模式研究与示范(2014BAD14B006); 教育部创新研究团队项目(IRT13019); 教育部重大科技项目(313028)

第一作者: 杜珊珊(1989—), 女(汉), 新疆自治区石河子市人, 硕士研究生, 研究方向为作物栽培与耕作。E-mail: dushsh12@lzu.edu.cn。

通信作者: 沈禹颖(1965—), 女(汉族), 上海市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事草地农业系统研究。E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn。

环境因素、植物生长以及人为活动的影响。研究土壤呼吸的连续变化以及影响因素,是准确预测未来气候变化条件下土壤呼吸变化的关键。许多研究表明,土壤呼吸与温度具有良好的相关性,在多种不同类型的生态系统中,土壤呼吸速率往往都是随温度增加而增大^[3],其响应方程有多种类型,包括指数方程、线性方程、二次方程和逻辑斯蒂方程等^[4]。为了定量描述土壤呼吸与温度间的关系,土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})成为重要参数被引用。耕作措施会改变土壤性质和作物生长条件,从而影响到土壤呼吸速率。研究表明,免耕降低土壤呼吸速率和排放通量^[5];而在玉米田的试验发现免耕土壤呼吸速率高于传统耕作^[6]。与传统耕作相比,各种覆盖措施都能不同程度地降低土壤呼吸^[7];但官情等人^[8]的研究发现秸秆覆盖在全生育期能够提高6.6%~10.2%的土壤呼吸速率。从以往的研究看,关于免耕与翻耕、秸秆覆盖措施对土壤呼吸影响的研究尚无定论,且目前对于长期连续原位监测耕作措施对土壤呼吸影响的研究尚未见报道。因此,本研究在多年定位试验的基础上,以玉米(*Zea mays*)—冬小麦(*Triticum aestivum*)—箭筈豌豆(*Vicia sativa*)轮作系统为对象,探讨保护性耕作对箭筈豌豆主要生育期土壤呼吸的影响,评价不同耕作措施对降低或减缓土壤 CO_2 排放的贡献,以期为黄土高原旱作农业发展生态保护型农作制模式、确定该区保护性农业的发展方向提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于兰州大学庆阳黄土高原试验站(东经 $107^{\circ}51'$,北纬 $35^{\circ}39'$),在甘肃省庆阳市西峰区什社乡境内,属于陇东黄土高原中部,海拔1298 m。年降雨量480~660 mm,全年降雨60%以上,多集中在7—9月,年蒸发量1100~1500 mm,年日照时数2300~2700 h,年均气温8~10℃,极端最高气温达到39.6℃,极端最低气温-22.4℃,无霜期150~190 d,土壤为黑垆土。

1.2 试验设计

保护性耕作试验始于2001年,共设4个耕作处理:传统耕作(T),传统耕作+秸秆还田(TS),免耕(NT),免耕+秸秆还田(NTS),每个处理4个重复,完全随机区组排列,共16个小区,小区面积为4 m×13 m。传统耕作处理分别于作物收获后和播种前各耕作1次,耕深30 cm左右;免耕处理除播种时采用联合作业的免耕播种机播种外,其余时间不扰动土壤。秸秆还田处理均采用前茬作物秸秆作为覆盖物。

作物生长期定期人工除草。

作物轮作序列为玉米—冬小麦—箭筈豌豆。在4月上中旬播种玉米(播量300 kg/hm²,行间距40 cm),9月中下旬收获,玉米收获后立即播种冬小麦(播量187 kg/hm²,行间距20 cm),翌年6月底收获,箭筈豌豆(播量75 kg/hm²,行间距25 cm)在小麦收获后立即播种,10月中旬收获。为消除不同年份作物生长的差异,使3种作物在同一轮作周期、同一序列内同时出现,采用双序列设计。玉米和冬小麦播种时均以磷二铵(含氮18%, P_2O_5 46%)为底肥,玉米拔节期、冬小麦返青期追尿素(含氮46%)300和150 kg/hm²,箭筈豌豆播种时施用磷肥。

1.3 土壤呼吸的测定

土壤呼吸速率测定采用LI-8150~16多通道土壤碳通量测量系统(LI-COR, Linco ln, NE, USA)。测定前将直径为20 cm,高10 cm的土壤呼吸底座(PVC)埋入土壤中,露出地面5 cm与气室紧密接触(定期除去底座PVC环内的一切活体)。为了减少安置测定基座PVC环对土壤系统的破坏,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PVC环对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动。选择在2012年9月19日(箭筈豌豆花期)至2012年10月15日(箭筈豌豆收获期)进行连续测定。大气温度测定采用Campbell Scientific气象站(CR200 Datalogger)。

1.4 数据统计分析

采用SPSS 17.0软件进行统计分析,对4种耕作处理下土壤呼吸速率进行单因素方差分析,采用线性模型和非线性模型拟合土壤日呼吸速率与大气温度的回归方程。用Excel软件进行图形制作。

1.4.1 温度敏感性指数 Q_{10} 的计算 当温度和土壤呼吸之间的关系用指数函数拟合时, Q_{10} 可用公式(1)估算:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (1)$$

式中: Q_{10} ——表示温度每增加10℃时土壤呼吸速率增加的倍数; b ——温度响应系数。

1.4.2 土壤碳排放量的计算 土壤碳排放量的计算公式为:

生育期的土壤碳排放量(kg/hm²)=土壤呼吸速率[g/(m²·d)]×作物生育期天数/1.036^[9]

2 结果与分析

2.1 箭筈豌豆生长期温度和降水变化

箭筈豌豆在花期至收获期的平均气温最高达17.9℃,最低为8.2℃,温差为9.7℃。降水主要出

现在 9 月 20 日和 25 日,且导致了平均温度的降低。少量降水在 9 月 21 日和 24 日(图 1)。

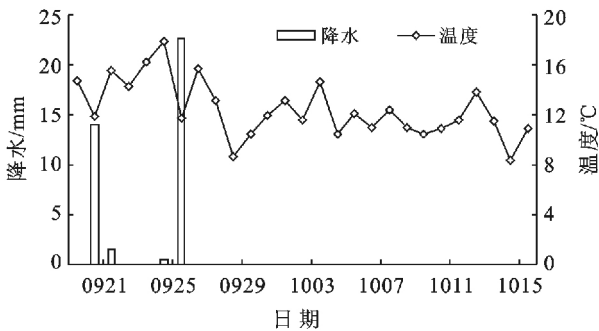


图 1 箭筈豌豆生长期间日均气温与日降水量

2.2 箭筈豌豆生育期内土壤呼吸速率的季节变化

不同耕作处理下箭筈豌豆于花期至收获期的土壤呼吸变化规律基本一致,花期(9 月 19—20 日)各处理下的土壤呼吸速率达到最高,以 NTS 处理下的土壤呼吸速率最低,TS 处理下土壤呼吸速率最高,比 NT 处理显著高出 81.12% ($p < 0.05$),是 NTS 处理的 2 倍,与 NT 处理相比差异不显著 ($p > 0.05$);收获期(10 月 4 日),NTS 处理下土壤呼吸速率依然显著低于其他处理,分别是 TS,NT,T 处理的 60%,42.19%,53.75% ($p < 0.05$),2 个时期相比,T,NT,TS,NTS 花期的土壤呼吸平均速率分别比收获期同处理下高出 10.45%,11.23%,15.53%和 45.09%。9 月 20—21 日和 25 日,箭筈豌豆土壤呼吸速率有急剧下降,这是由于阴雨天气,致使田间持水量升高,抑制了土壤生物和根的呼吸,限制了气体的运动。各处

理下土壤呼吸速率与日平均大气温度变化基本一致(图 2)。

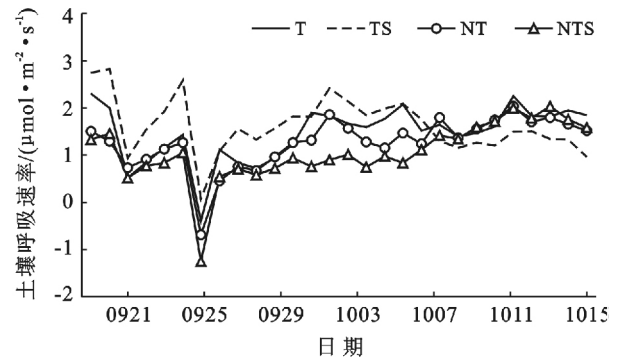


图 2 保护性耕作下箭筈豌豆花期至收获期土壤呼吸速率的季节变化

2.3 花期箭筈豌豆土壤呼吸速率日动态

通过晴天(10 月 1 日)和阴天(10 月 8 日)来分析土壤呼吸速率的日动态规律。在晴天早晨,随着温度的上升,各处理下土壤呼吸速率随之增大,在 14:00 出现最大值,此时以 NTS 的土壤呼吸速率最低,为 $2.59 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,由低到高依次为:NT [$2.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] < TS [$3.09 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] < T [$3.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],各处理间无显著差异,14:00 后随着土壤温度降低,作物根系和土壤微生物呼吸作用减弱,土壤呼吸变化规律呈单峰曲线;阴天的土壤呼吸变化规律较为平缓,变化范围在 $1.15 \sim 2.44 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,且 4 种处理间数值差异不明显。T,NT,TS,NTS 在晴天的土壤呼吸平均速率分别比阴天高出 17.5%,13.97%,23.98%和 35.52%(图 3)。

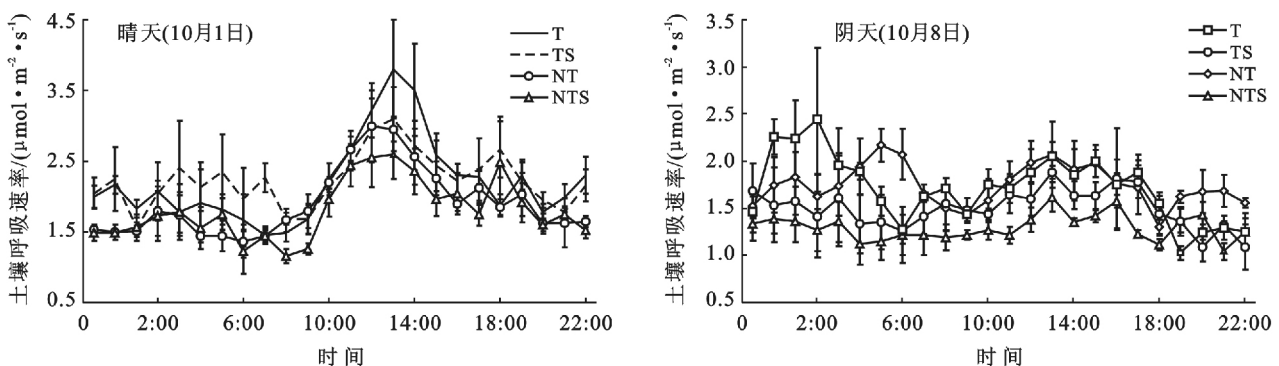


图 3 晴天和阴天的土壤呼吸速率日变化

2.4 花期至收获期箭筈豌豆土壤 C 排放量

从花期至收获期,各处理下箭筈豌豆土壤 C 排放量均达 $3 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以上,其中 TS 处理下土壤 C 排放量最高,达 $5.08 \text{ kg}/\text{hm}^2$,NTS 处理下最低,为 $3.09 \text{ kg}/\text{hm}^2$,分别比 TS,NT 和 T 处理显著低了 39.17%,

21.37%和 30.25% ($p < 0.01$)。可见,在一个连续测量的生育期内,免耕加秸秆覆盖措施对减少土壤 C 排放具有一定的贡献(图 4)。

2.5 土壤呼吸日变化对大气温度的响应

运用线性和指数模型分别对各处理下土壤日呼

吸变化与具有极显著相关性的大气温度进行拟合,线性和指数模型都能较好地描述土壤日呼吸与温度的关系,其中在 T, TS 处理下,线性模型的决定指数 R^2 (69.9%, 63.6%) 均高于指数模型 (60.1%, 57.8%), 说明线性模型对实测点的估测的可靠程度大于指数模型;而在两个免耕处理 (NT, NTS) 下,线性模型的决定指数 R^2 (60.3%, 61.5%) 分别低于指数模型 (69.3%, 74.3%), 说明免耕处理下温度与呼吸的关系趋于复杂 (表 1)。 Q_{10} 值是衡量土壤呼吸的温度敏感性指数, Q_{10} 值越高表明土壤呼吸速率对温度的依赖性越大, 指数模型的 Q_{10} 值大小依次为: T (1.97) > NT (1.62) > TS (1.58) > NTS (1.52), 各处理下指数模型所获 Q_{10} 值均低于线性模型, 但无论是由线性模型还是指数模型其 Q_{10} 值均变动于 1.52~2.51。

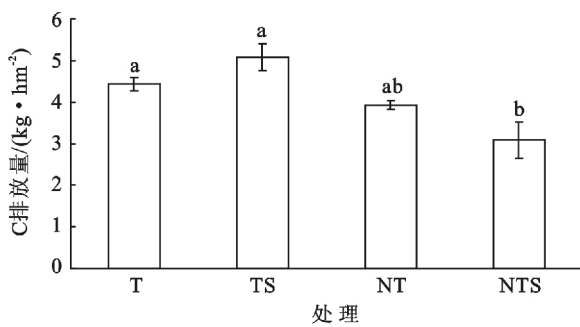


图 4 保护性耕作下箭筈豌豆花期至收获期的土壤 C 排放量

表 1 土壤日呼吸与大气温度的曲线拟合方程和 Q 值

处理	回归方程	Q_{10}	F	sig	R^2
T	$Y=0.401+0.092X$	2.51	48.725	0.000	0.699
	$Y=0.619e^{0.068X}$	1.97	36.707	0.000	0.636
TS	$Y=0.788+0.079X$	2.20	33.080	0.000	0.601
	$Y=0.952e^{0.046X}$	1.58	30.088	0.000	0.578
NT	$Y=0.596+0.059X$	1.80	33.425	0.000	0.603
	$Y=0.703e^{0.048X}$	1.62	35.129	0.000	0.615
NTS	$Y=0.626+0.048X$	1.62	49.655	0.000	0.693
	$Y=0.712e^{0.042X}$	1.52	63.455	0.000	0.743

3 讨论

许多研究表明,土壤呼吸具有明显的日变化和季节变化,韩广轩和周广胜^[10]综述了国内外已有研究发现土壤呼吸作用的日变化多呈单峰型曲线,生长旺盛期土壤呼吸速率高于生育初期和后期。江晓东等^[11]报道冬小麦/夏玉米一年两熟灌溉农田中,作物花期土壤呼吸速率均高于收获期,本研究结果符合相同规律。从日动态来看,呼吸速率峰值大多出现在午后,如水稻田土壤 CO_2 排放通量最大值出现在

15:00^[2],保护性耕作下河西走廊灌溉冬小麦土壤呼吸日变化峰值出现在 14:00—15:00^[12],华北平原冬小麦农田土壤呼吸日变化峰值出现在 12:30—14:30^[13],玉米土壤呼吸日变化最大值在 14:00^[14]。不同区域土壤日呼吸峰值出现时间有一定的差异,是由测定时期及环境的不同造成。江晓东等^[15]的研究结果表明:在晴天和阴天 2 种综合气象条件下,土壤呼吸速率晴天高于阴天,原因可能是在晴天土壤呼吸的变化主要受太阳辐射和温度的影响;而在阴天,温度变化不明显,主要受太阳辐射的影响。耕作方式对农田 CO_2 的排放有一定的影响,众多研究认为^[5,11]耕作条件下农田土壤呼吸速率显著高于免耕。杨倩等^[16]研究表明,玉米—小麦—大豆轮作系统中,与传统耕作相比,免耕和秸秆还田均能不同程度地降低小麦和玉米生土壤呼吸。本研究得出免耕+秸秆覆盖 (NTS) 措施的土壤 C 排放量最低,这是因为长期免耕条件下土壤日益变得紧实,以致空气接触面积较小,加之秸秆覆盖下,土壤温度相对较低,使得土壤呼吸较弱;耕作对耕层土壤水稳性团聚体和孔隙结构的破坏更为强烈,土壤温度和水分变化显著,使得耕作下土壤呼吸排放量较高^[5]。温度是影响土壤呼吸的控制性因素^[17],土壤呼吸随着温度的升高而增加^[18],苜蓿人工草地土壤呼吸速率与大气温度呈显著正相关^[19]。本研究中箭筈豌豆地的土壤呼吸速率同样正相关于大气温度。可见,温度是土壤呼吸速率的主要气象因子。土壤呼吸与温度的关系常符合线性模型或指数模型,但哪种模型更为适宜,还没有定论^[10]。Raich 等^[20]提出 Q_{10} 是大气碳平衡估算的关键参数之一,其值大致在 1.3~3.3 之间。本研究发现 Q_{10} 的变化范围为 1.52~2.51。其中, T 处理下 Q_{10} 值大于其他 3 个保护性耕作处理,说明耕作下土壤呼吸对温度的变化更为敏感,表明保护性耕作能缓冲温度变化对土壤呼吸的影响,进而抑制了土壤呼吸。

4 结论

- (1) 箭筈豌豆田花期土壤呼吸速率高于收获期;土壤呼吸日变化呈单峰曲线,最大值均出现在 14:00 左右,晴天的土壤呼吸速率高于阴天。
- (2) 免耕加秸秆还田 (NTS) 处理的土壤呼吸速率较其他处理的土壤呼吸速率要低,且土壤 C 排放量最低,对减少温室气体排放有一定的贡献。
- (3) 耕作处理 (T, TS) 的土壤呼吸速率和大气温度呈现较好的线性相关,而免耕处理 (NT, NTS) 的土壤呼吸速率和大气温度具有较好的指数相关。

[参 考 文 献]

- [1] 曹兴,金莉莉. 农田生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 现代农业科技,2008(22):155-156,159.
- [2] 韩广轩,朱波,江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素[J]. 植物生态学报,2006,30(3):450-456.
- [3] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content[J]. Nature, 2000,408(14):789-790.
- [4] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001,33(2):155-165.
- [5] 张宇,张海林,陈继康,等. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(9):3354-3360.
- [6] 代快,蔡典雄,王燕,等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究:土壤温度对土壤呼吸速率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010,47(6):64-69.
- [7] 孙小花,张仁陟,蔡立群,等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(9):2173-2178.
- [8] 官情,王俊,宋淑亚,等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1471-1476.
- [9] 张前兵,杨玲,王进,等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(12):2420-2430.
- [10] 韩广轩,周广胜,许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态与碳收支初步估算[J]. 中国生态农业学报,2009,17(5):874-879.
- [11] 江晓东,迟淑筠,宁堂原,等. 少免耕模式对土壤呼吸的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(2):253-256.
- [12] 于爱忠,黄高宝,柴强. 不同耕作措施对西北绿洲灌区冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 草业学报,2012,21(1):273-278.
- [13] 邓爱娟,申双和,张雪松,等. 华北平原地区麦田土壤呼吸特征[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2286-2292.
- [14] 吕佩毓,柴强,李广. 不同施氮水平对玉米生长季土壤呼吸的影响[J]. 草业科学,2011,28(11):1919-1923.
- [15] 江晓东,李永秀. 气象因子对麦田土壤呼吸速率影响的途径分析[J]. 安徽农业科学,2009,37(2):701-702,707.
- [16] 杨倩,张清平,蒋海亮,等. 保护性耕作对黄土旱塬玉米土壤呼吸及微生物数量的影响[J]. 草业科学,2012,29(12):1810-1815.
- [17] 寇太记,苗艳芳,庞静,等. 农田土壤呼吸对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 生态环境,2008,17(3):950-956.
- [18] Chen Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Responses of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol Grassland, Inner Mongolia[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003,27(4):441-447.
- [19] 徐丽君,唐华俊,杨桂霞,等. 不同苜蓿品种人工草地土壤呼吸及对土温反应[J]. 西北植物学报,2010,30(9):1882-1886.
- [20] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992,44(2):81-99.

(上接第 143 页)

- [12] 杨大文,李翀,倪广恒,等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报,2004,59(1):143-154.
- [13] 刘昌明,夏军,郭生练,等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. 水科学进展,2004,15(4):495-500.
- [14] 鲍新华,洪梅,周祖昊,等. 基于 DEM 的等流时单元法在大流域分布式水文模型中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2010,40(2):337-341.
- [15] 李燕,陈孝田,朱朝霞. HEC-HMS 在洪水预报中的应用研究[J]. 人民黄河,2008,30(4):23-24.
- [16] 雍斌,张万昌,赵登忠,等. HEC-HMS 水文模型系统在汉江褒河流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2006,26(3):86-90.
- [17] 李瑞雪,张明军,金爽,等. 乌鲁木齐河流域气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 干旱区地理,2010,33(2):243-250.
- [18] 穆艾塔尔·赛地,阿不都·沙拉木,崔春亮,等. 新疆天山北坡山区流域水文特征分析[J]. 水文,2013,33(2):87-92.
- [19] 姚海燕,张民. 乌鲁木齐河流域水管理信息系统[J]. 水文,2006,26(2):78-80,96.