4 种典型荒漠草原植物群落土壤呼吸对封育禁牧的响应

陈 林，李学斌，徐 坤，王 磊

（宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地，西部生态与生物资源开发联合研究中心，宁夏 银川 750021）

摘 要：采用动态密闭气室分析法，分别研究了放牧与围封条件下赖草群落、沙蒿群落、甘草群落、冰草群落 4 种典型荒漠草原植物群落土壤呼吸及其与温度因子的关系，揭示了 4 种典型荒漠草原植物群落土壤呼吸对封育禁牧的响应过程。结果表明，放牧与围封样地的土壤呼吸速率日动态均呈现出不对称的单峰型曲线，高峰值一般出现在 14:00—16:00。围封样地土壤呼吸速率值大于放牧样地，但各监测时刻差异显著性不尽相同。放牧与围封样地各植物群落中较深层土温(10，15 cm)和土壤呼吸速率的相关性普遍高于浅层土温(5 cm)、深层土温(20 cm)和气温，其中 15 cm 土层温度与土壤呼吸速率相关性最高。除沙蒿群落外，其他 3 种植物群落放牧样地 Q_{10} 值均显著低于围封样地，Q_{10} 值大小依次均为：沙蒿群落＞赖草群落＞甘草群落＞冰草群落，其中沙蒿群落 Q_{10} 值远高于其他 3 个群落。

关键词：荒漠草原；封育；土壤呼吸速率；响应

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)05-0156-05 **中图分类号**：S152.6

Responses of Soil Respiration Rates of Four Plant Communities to Grazing Prohibition in Deserted Grassland

CHEN Lin, LI Xue-bin, XU Kun, WANG Lei

(*The MOE Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China, Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, and United Research Center for Ecology and Exploitation of Biological Resources in Western China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: Dynamic closed chamber IRGA method is used to study the relationship between soil respiration and temperature of four deserted grassland communities, i. e., *Artemisia desertorum*, *Leymus secalinus*, *Glycyrrhiza uralensis and Agropyron crisatum*, in grazing and enclosed plots, and reveal their effects on soil respiration in enclosed plots. The main results are as follows: The diurnal patterns of soil respiration rate in grazing and enclosed plots manifest a single-peak asymmetric curve, and the maximum soil respiration rate occurs at 14:00—16:00. Soil respiration rates in enclosed plots are higher than those in grazing plots, but the significant differences are distinct in the communities of the grazing and the enclosed plots at certain time. The correlation between soil temperature and soil respiration rates at 10 and 15 cm depths are higher than that at 5 and 20 cm depths. At 15 cm depth, air temperature is well correlated with soil respiration rate. Besides the *Artemisia desertorum* community, the Q_{10} values of other plant communities in grazing plots are remarkably lower than those in enclosed plots. The Q_{10} values are in the order of *Artemisia desertorum* > *Leymus secalinus* > *Glycyrrhiza uralensis* > *Agropyron crisatum*. The Q_{10} value of *Artemisia desertorum* community is greatly above other communities.

Keywords: deserted grassland; enclosure; soil respiration rate; response

收稿日期：2011-11-06 **修回日期**：2011-11-26

资助项目：国家重大基础研究前期研究专项“荒漠草原农牧系统稳定性与维持机理研究”(2010CB434800)；国家自然科学基金“农牧交错区退耕封育对土壤有机碳库储量和稳定性影响及机制研究”(31140017)；宁夏自然科学基金项目“宁夏中部干旱带不同封育年限荒漠草原凋落物特征及对土壤的生态效应”(NZ1017)

作者简介：陈林(1983—)，男(汉族)，湖南省湘乡市人，硕士，研究实习员，主要从事干旱、半干旱区资源与环境及恢复生态方面研究。E-mail: chenlin198388@163.com。

通信作者：李学斌(1972—)，男(汉族)，宁夏回族自治区盐池县人，博士，副研究员，主要从事草地生态方面的研究。E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn。

中国拥有天然草原近 4.00×10^8 hm^2,占国土总面积的 41.7%,其中可利用草原面积 3.30×10^8 hm^2,是我国面积最大的陆地生态系统,其中最具有代表性的温带草原面积约占我国草地总面积的 78%。放牧作为人类管理利用草地生态系统的最主要的途径,是草地生态系统常见的一种土地利用方式。放牧对草地生态系统的影响是多方面的,对草原植物、凋落物、土壤等均存在着不同程度的影响,这些因子不仅是影响草地群落土壤呼吸最主要的因素,而且在一定程度上影响水、热因子的作用效应。

国内外有关放牧对土壤呼吸的影响的研究较多,但结果不尽一致。已有的研究结果表明,放牧将显著降低土壤呼吸强度[1],而有的研究则认为,无牧区植被特征和土壤养分状况虽明显好于放牧区,但两者土壤呼吸强度差异并不显著[2],还有的研究认为放牧促进土壤呼吸[3]。由此可见,放牧仍然是当前估算草原碳收支的不确定因素之一[4],且影响土壤呼吸作用的主导温度因子是大气温度还是土壤温度,结论也是不一致的,尤其是对退化草原和围栏封育草原之间主导因子的区别更是鲜有报道[5]。

"退耕还林还草"和"封育禁牧"已在宁夏实施了 10 a,随着这些重大生态工程的实施,荒漠草原逐渐得到了治理和恢复[6-7]。但经过农户访问和实际调查(经常发现大量的家畜排泄物),证明部分荒漠草原还是受到一些人为干扰和放牧活动的影响。鉴此,本研究分析放牧和围封对不同植物群落土壤呼吸速率的差异,探讨温度因子和土壤呼吸速率的关系,通过认识土壤呼吸对放牧活动和围封响应的基本特征为其碳循环研究提供科学依据。

本研究针对草地土壤呼吸进行野外实验研究的探讨将对我国乃至全球碳源—汇的准确估算具有重要的科学意义。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县东南部。该地区属鄂尔多斯台地向黄土高原的过渡地带,地势南高北低,属于典型的中温带大陆性气候,年平均气温 8.1 ℃,年降水量在 250～350 mm,主要集中在 7—9 月,约占全年降水量的 60% 以上,年蒸发量高达 2 710 mm,年均无霜期 165 d。土壤类型主要是灰钙土,其次是风沙土和黑垆土。土壤质地多为轻壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。样地基本情况采用 8 月份的调查结果(表 1)。

表 1　典型群落围封样地和放牧样地基本情况

项 目	冰草群落		甘草群落		赖草群落		沙蒿群落	
	围封样地	放牧样地	围封样地	放牧样地	围封样地	放牧样地	围封样地	放牧样地
土壤 pH 值	8.95	9.00	8.85	8.89	9.04	8.99	9.03	9.07
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.59	1.63	1.52	1.59	1.53	1.62	1.50	1.55
植被盖度/%	76.0	25.0	51.7	35.0	83.6	30.0	90.0	90.0
鲜生物量/(g·m^{-2})	245.4±21.0	102.9±18.2	156.2±23.6	50.3±9.6	117.9±11.9	20.0±9.7	76.9±13.6	68.9±15.6
枯落物量/(g·m^{-2})	201.5±33.3	88.9±14.6	105.9±22.8	40.6±12.7	143.3±21.6	9.5±5.3	50.8±11.8	44.1±15.3
伴生种	银灰旋花、猫头刺、刺叶柄棘豆、胡枝子、砂珍棘豆等	猫头刺、骆驼蓬、猪毛蒿、胡枝子	胡枝子、老瓜头、二裂委陵菜	二裂委陵菜、猪毛蒿、胡枝子、银灰旋花、乳浆大戟等	甘草、铁杆蒿	白草、猪毛蒿、地景、乳浆大戟、绵蓬、铁杆蒿、甘草	白草、细叶山苦荬、黑蒿	白草、胡枝子、猪毛蒿、黑蒿

1.2　研究方法

1.2.1　试验设计　在宁夏回族自治区盐池县高沙窝乡国家级草原资源生态监测站荒漠草原典型植物群落固定样地内选取蒙古冰草(以下简称冰草)群落、甘草群落、赖草群落和沙蒿群落 4 个典型荒漠草原植物群落。各类型监测站点草地围栏封育时间均为 2005 年底,面积为 40 m×40 m。分别选取围栏封育草地(围封样地)和围栏外未封育、连续放牧草地(放牧样地)为研究样地,共 8 个样地。考虑到土壤呼吸强度与温度的相关性最为明显[8],且夏季土壤呼吸速率比其他季节的高[9],可以反映出土壤呼吸状况的本质特征[10],因此,选择 2011 年的夏季(8 月)进行各植被类型土壤呼吸的测定。

1.2.2　测定方法　碱液吸收法虽然已被普遍采用,沿用至今已有 70 a 余,但由于不能进行短时间内连续测定而限制了其适用性。基于动态密闭气室法和碱液吸收法 2 种测定方法具有很好的相关性[11],本研究土壤呼吸速率测定采用动态密闭气室分析法。测定仪器为英国 PP Systems 公司生产的基于非色散红外线与控制和线形化微处理器的 EGM-4 便携式环境监

测仪，仪器由 EGM-4 便携式 CO_2 分析仪和 SRC-1 土壤呼吸室组成。测量时，土壤呼吸室紧扣地表，使土壤呼吸室内的气流能够充分与地表的气体混合。每个样地各布置 5 个重复样点，样点之间相距约为 5 m，呈 M 型分布，选择晴天 6:00—18:00 共 7 个时段，每 2 h 测定 1 次，连续测定 3 d。

在测定土壤呼吸的同时采用地温计（WI 15064，东西仪科技有限公司）对 5，10，15，和 20 cm 深度的土壤温度进行测定。大气温度利用自动气象站（Vantage Pro 2 Weather Stations，USA）测定。

1.3 数据处理

应用 SPSS 17.0 软件进行数据的统计分析，采用单因素方差分析（One—Way ANOVA）和最小显著差异法（LSD）比较不同数据组间的差异；运用相关分析中的 Pearson 相关分析对放牧与围栏样地土壤呼吸作用日动态与气温和不同层次土温进行相关性比较；运用 Levenberg—Marquardt 运算法则确定模型参数。插图采用 SigmaPlot 10.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 围封与放牧样地土壤呼吸动态

图 1 为围封样地和放牧样地土壤呼吸速率的日动态（6:00—18:00）。由图 1 可以看出，围封和放牧样地土壤呼吸作用日动态相似，均呈不对称的单峰型曲线，高峰值一般出现在午后 14:00—16:00，最低值出现在 6:00 和 18:00。这主要是因为土壤中微生物的活动受温度的影响，当温度较低时，微生物对土壤中有机物质的分解减弱，同时，呼吸作用也减弱；当温度升高后，微生物活动开始活跃，加快了对土壤中有机物质的分解，释放出 CO_2，同时呼吸作用加强。

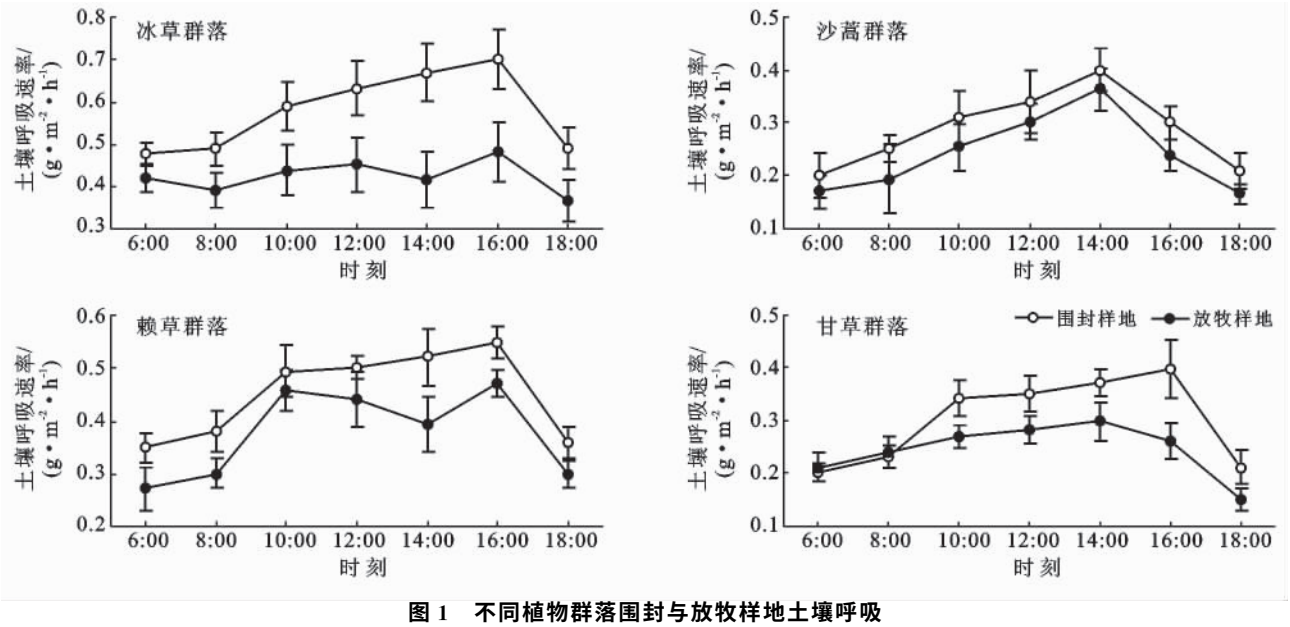


图 1 不同植物群落围封与放牧样地土壤呼吸

总的来看，各群落中围封样地土壤呼吸速率值大于放牧样地，但各监测时刻各群落放牧与围封样地间差异显著性不尽相同。冰草群落中，围封样地的日平均土壤呼吸速率〔0.58 g/(m² · h)〕远大于放牧样地〔0.42 g/(m² · h)〕，方差分析表明两者各个监测时刻和平均值均达到了显著水平（$p<0.05$）。沙蒿群落中，围封样地的日平均土壤呼吸速率〔0.29 g/(m² · h)〕略大于放牧样地〔0.24 g/(m² · h)〕，但方差分析表明，两者均未达到显著水平（$p>0.05$）。

赖草群落中，围封样地的日平均土壤呼吸速率〔0.45 g/(m² · h)〕远大于放牧样地〔0.38 g/(m² · h)〕，方差分析表明除 10:00 左右外，两者其他监测时刻和平均值均达到了显著水平（$p<0.05$）。而甘草群落中，围封样地的日平均土壤呼吸速率〔0.30 g/(m² · h)〕略大于放牧样地〔0.24 g/(m² · h)〕，方差分析表明从 10:00 左右开始，两者土壤呼吸速率及平均值差异显著（$p<0.05$）。

出现以上现象的原因可能是通过围封禁牧，围封样地内的地上生物量得以恢复，从而土壤有机质积累增加，为微生物的分解提供了较为充足的保障，因此，围封样地内土壤呼吸速率要高于放牧样地。

2.2 土壤呼吸与温度因子的相关性

在一昼夜内，土层温度变化大，水分变化小，所以土壤呼吸作用日动态主要受土层温度控制[12-13]。对放牧与围封样地土壤呼吸速率日动态与气温和不同层次土温进行了相关性比较，结果如表 2 所示。

表 2　各植物群落土壤呼吸速率与温度因子的相关性

群落类型	样地	气温/℃	土壤温度/℃			
			5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
冰草群落	放牧	0.195	0.250	0.390	0.586*	0.410
	围封	0.683*	0.750*	0.878**	0.878**	0.821**
沙蒿群落	放牧	0.482	0.410	0.450	0.718*	0.060
	围封	0.333	0.451	0.488	0.651*	0.177
赖草群落	放牧	0.390	0.488	0.513	0.550*	0.418
	围封	0.619*	0.714*	0.751*	0.781*	0.700*
甘草群落	放牧	0.238	0.390	0.429	0.524*	0.282
	围封	0.619*	0.714*	0.781**	0.810**	0.732*

注：* 为显著相关（$p<0.05$）；** 为极显著相关（$p<0.01$）。

总的来看，各植物群落中放牧和围封样地较深层土温（10—15 cm）和土壤呼吸速率的相关性普遍高于浅层土温（5 cm）、深层土温（20 cm）以及大气温度，其中 15 cm 土层温度与土壤呼吸速率相关性最高，平均相关系数达到了 0.69，这主要是因为温度对土壤中微生物分解活动有一定的影响，从而影响到土壤中 CO_2 的排放，也可能与草本植物根系主要分布在该层，根系呼吸作用对总呼吸作用的贡献较大有关。

除沙蒿群落外，其他 3 个群落围封样地各温度因子与土壤呼吸速率相关性均达到了显著（$p<0.05$）或者极显著水平（$p<0.01$）；而放牧样地中，由于受到人为干扰，除 15 cm 处土层温度与土壤呼吸速率达到显著相关外，其他温度因子均未达到显著相关。

2.3　不同植物群落土壤呼吸敏感性（Q_{10}）

为了探讨荒漠草原不同植物群落土壤呼吸敏感性（Q_{10}），结合土壤呼吸速率与土壤温度最常用、应用较为简便的关系模型（$y=ae^{bT}$）[14]，Q_{10} 值通过下式确定[15]：

$$Q_{10}=e^{10b}$$

式中：b——温度反应系数。b 反映土壤呼吸对温度的敏感响应程度，但是习惯上人们用一次指数模型 Q_{10} 值，Q_{10} 是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的指标，指温度每升高 10 ℃时土壤呼吸速率增加的倍数。由于 15 cm 处土层温度与土壤呼吸速率相关性最大（表 2），故本研究中以 15 cm 处土层温度和土壤呼吸速率的关系计算 Q_{10} 值，结果如图 2 所示。

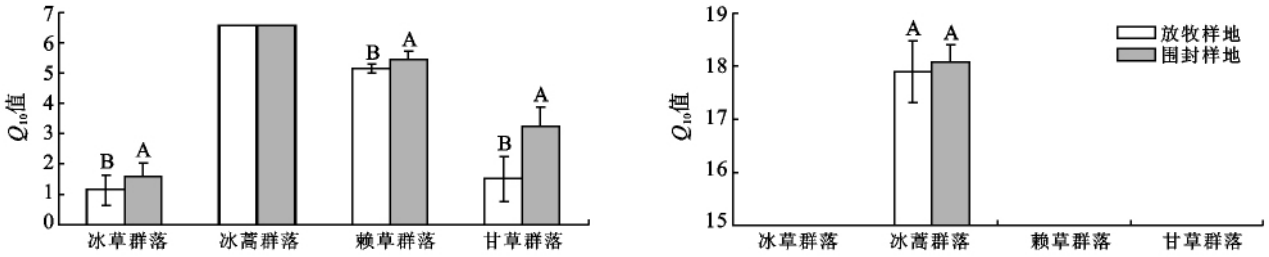


图 2　各植物群落不同样地 Q_{10} 值

注：不同字母表示同一群落不同样地差异显著（$p<0.05$）

从图 2 可以看出，不同植物群落围封和放牧样地 Q_{10} 值大小均为：沙蒿群落＞赖草群落＞甘草群落＞冰草群落，其中沙蒿群落 Q_{10} 值远远高于其他 3 个群落，说明沙蒿群落中土壤呼吸对温度最为敏感，受温度变化的影响最大，这主要是因为不同植物群落类型下，植物根系和土壤微生物中不同的酶在不同的温度范围内可能会失活甚至被杀死。

各植物群落中放牧样地 Q_{10} 值均低于围封样地，除沙蒿群落外，其他 3 个群落围封和放牧样地之间差异均达到了显著水平。

3　结论与讨论

（1）围封和放牧样地土壤呼吸作用日动态相似，均呈不对称的单峰型曲线，高峰值一般出现在午后 14:00—16:00，最低值出现在 6:00 和 18:00。围封样地土壤呼吸速率值大于放牧样地，这和马涛等[4]、贾丙瑞[5]、Osman 等[16]的研究结果一致。这可能是由于在生长季植物根系呼吸占土壤总呼吸比重较大，而连续的放牧使群落地下生物量大大降低[17]，植物叶面积减少进而减弱光合作用向地下的能量输入，致使地下根的现存量和生产力降低[18]。此外，根系分泌物可以促进土壤微生物呼吸[19]，而放牧降低地下生物量的同时，也减少了根系分泌物的产生[4]，从而使放牧样地土壤呼吸速率小于封育样地。

（2）影响土壤呼吸的因素众多，在日尺度下，土壤呼吸速率主要受温度因子的影响，不同研究得出的土壤呼吸速率与土壤温度（不同深度）、气温的相关性不同。陈全胜等[20]在锡林河流域典型草原退化群落研究中发现，土壤呼吸速率与气温有较好的相关性。贾丙瑞等[5]研究认为，在围栏与放牧影响下，呈现不同的结果：围栏样地土壤呼吸速率日动态与地表温度相关性最好，而放牧样地与地下 5 cm 温度相关性最好。本研究中，围封和放牧样地较深层土温（10，15 cm）与土壤呼吸速率的相关性普遍高于浅层土温

(5 cm)、深层土温(20 cm)以及大气温度,其中 15 cm 土层温度的相关性最大。

(3) 土壤呼吸对温度的敏感性表现为随着温度的升高,CO_2 排放量显著增加。模拟土壤呼吸对温度的敏感性模型有多种且在不断完善中,但简单的 Q_{10} 经验模型仍被普遍使用。有研究表明,重度放牧高寒草甸群落的 Q_{10} 值要小于轻度放牧群落[21]。Zhou 等[22]也发现在美国某高草草原,人工剪草处理使得土壤呼吸及其各组分(土壤异养呼吸和根系呼吸)的 Q_{10} 值显著下降($p<0.05$)。放牧改变了土壤呼吸对温度的敏感性。本研究中,放牧样地 Q_{10} 值均低于围封样地,除沙蒿群落外,其他 3 个群落围封和放牧样地之间差异均达到了显著水平。沙蒿群落围封和放牧样地 Q_{10} 值均远远高于其他 3 个群落,其原因有待进一步研究。

由于本研究只是 1 a 中的夏季数据,得出的结论具有一定的局限性,今后仍然需要对这 4 种植物群落进行长期定位监测,为准确预测未来荒漠草地生态系统土壤碳库的动态变化提供参考。

[参 考 文 献]

[1] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):53-69.

[2] 李凌浩,王其兵,白永飞,等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. 植物生态学报,2000,24(6):680-686.

[3] 王跃思,胡玉琼,纪宝明,等. 放牧对内蒙古草原温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学,2002,22(6):490-494.

[4] 马涛,董云社,齐玉春,等. 放牧对内蒙古羊草群落土壤呼吸的影响[J]. 地理研究,2009,28(4):1040-1046.

[5] 贾丙瑞,周广胜,王风玉,等. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较[J]. 应用生态学报,2004,15(9):1611-1615.

[6] 马忠玉,宋乃平,郭颖. 中国退耕还林政策评估研究[J]. 宁夏社会科学,2006,137(4):61-65.

[7] 杜茜,马琨. 宁夏荒漠草原恢复演替过程中物种多样性与生产力的变化[J]. 生态环境,2007,16(4):1225-1228.

[8] 杨金艳,王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO_2 通量的影响[J]. 植物生态学报,2006,30(2):286-294.

[9] 屈冉,李俊生,罗遵兰,等. 土壤微生物和有机酸对土壤呼吸速率的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(4):242-245.

[10] 冯朝阳,吕世海,高吉喜,等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):20-26.

[11] 杨晶,黄建辉,詹学明,等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法比较[J]. 植物生态学报,2004,28(3):318-325.

[12] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. Botanical Review, 1977,43(4):449-528.

[13] 赵景波,袁道先,马占武,等. 西安地区 4—5 月份土壤 CO_2 释放规律研究[J]. 中国岩溶,2000,19(4):309-303.

[14] 陈书涛,胡正华,张勇,等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. 环境科学,2011,32(8):2184-2192.

[15] 谢慧慧,樊军,齐丽彬,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区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.

[16] Osman A M. Root respiration of wheat plants as influenced by age, temperature, and irradiation of shoots [J]. Photosynthetica, 1971,5(1):107-112.

[17] 贾丙瑞,周广胜,王风玉,等. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析[J]. 应用生态学报,2005,16(8):1547-1552.

[18] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. Biogeochemistry, 2005,73(1):3-27.

[19] 王树起,韩晓增,乔云发. 根系分泌物的化感作用及其对土壤微生物的影响[J]. 土壤通报,2007,38(6):1219-1226.

[20] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报,2003,27(2):202-209.

[21] Cao G M, Tang Y H, Ma W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004,36(2):237-243.

[22] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO_2 efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem[J]. Global Change Biology, 2007,13(4):761-775.