

应用根去除法对内蒙古温带半干旱草原根系呼吸与土壤总呼吸的区分研究

刘立新^{1, 2}, 董云社^{1*}, 齐玉春¹, 周凌晔²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国气象科学研究院 中国气象局大气成分观测与服务中心 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 2005 年生长期分别对内蒙古锡林河流域温带半干旱草原中的羊草自由放牧草原、大针茅自由放牧草原和羊草退化草原中的土壤总呼吸速率和去根土壤的呼吸速率进行了野外测定, 初步探讨了在草地群落应用根去除法间接进行根系呼吸测定的可能性, 并应用该方法对草地群落根系呼吸占土壤总呼吸的比例进行了估测。结果表明, 应用根去除法在不同草地群落进行根系呼吸占土壤总呼吸比例的估测是切实可行的, 其比值范围介于 25% ~ 45% 之间, 平均值为 35.66%, 与国内外相关研究比较, 大大提高了其比值的估测精度, 在草地碳循环研究中具有较高的应用价值。

关键词: 根去除法; 土壤总呼吸; 根系呼吸; 比例

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)04-0689-06

Study of Distinguish Root Respiration from Total Soil Respiration by Root Exclusion Method in the Temperate Semi-Arid Grassland in Inner Mongolia, China

LIU Li-xin^{1, 2}, DONG Yun-she¹, QI Yu-chun¹, ZHOU Ling-xi²

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, China Meteorological Administration, Centre for Atmosphere Watch and Services, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to determine the possibility of measuring the root respiration by using root exclusion method, we conducted field experiments to measured total soil respiration and net soil respiration in three temperate grassland communities including *Leymus chinensis* free-grazed steppe, *stipa grandis* free-grazed steppe and *Leymus chinensis* degenerated free-grazed steppe in the growing season, 2005. At the same time, the proportion of the root respiration to the total soil respiration was estimated in different steppes by this method separately. The results indicated that the root exclusion method was very operable in estimating the proportion of the root respiration to the total soil respiration in temperate grassland communities, and the proportion varied from 25% ~ 45% with the mean value of 35.66%. The precision of this proportion was markedly improved compared with the correlation studies of both here and abroad, and it was provided with superior applied cost in the field of carbon cycle of grassland ecosystem.

Key words: root exclusion method; total soil respiration; root respiration; proportion

草地是陆地生态系统最重要的碳库之一, 草地土壤呼吸问题的研究对于深入理解草地生态系统的碳循环过程以及定量分析碳源汇问题具有十分重要的科学意义。而定量区分根系呼吸与土壤总呼吸量之间的比例关系是近年来草地土壤呼吸研究中的关键科学问题之一, 也是定量描述草地生态系统碳循环过程与机制的重要基础^[1~3]。

笔者曾尝试应用根系生物量外推法对我国温带半干旱区域草地根系呼吸与土壤总呼吸的区分问题进行野外试验研究, 并得出了初步成果^[4]。但是, 从目前国内外的相关研究来看, 区分根系呼吸与土壤总呼吸的技术方法尚处于探索性研究阶段, 不同方法间的数据结果存在很大的差异^[5~9], 但具体的对比试验相对较少, 很难确切说明哪种方法更具有优

越性。因此, 在应用根系生物量外推法对根系呼吸与土壤总呼吸进行区分的同时, 笔者还选择了根去除法进行同步研究, 试图通过这 2 种方法的对比, 深入探讨根系呼吸与土壤总呼吸区分的技术方法, 力争能够较准确地估算根系呼吸占土壤总呼吸的比例, 以期为草地土壤呼吸及碳循环机理的系统研究提供更为科学的基础资料与方法。

简单地说, 根去除法是 1 种间接测定根系呼吸

收稿日期: 2006-06-14; 修订日期: 2006-08-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412503); 国家自然科学基金项目(40501072); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-04); 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新项目(CXI0G-E01-03-01)

作者简介: 刘立新(1977~), 女, 博士后, 主要研究方向为全球变化与温室气体排放以及碳元素生物地球化学循环, E-mail: liulx@cma.gov.cn

* 通讯联系人, E-mail: dongys@igsrr.ac.cn

的方法,主要通过测定与比较有根和无根情况下的土壤呼吸速率来推算根系呼吸量. 这种方法操作简单,灵活性较强,资金消耗也较少,非常适合野外的系统研究工作. 但存在的问题是在去根过程中对土壤的自然性状产生一定的干扰,包括土壤的温度、湿度、有机质含量等,对于草地生态系统来说,草本植物根系细小繁多,很难将根系彻底清除,再生幼苗的影响也不能完全避免,对测量结果的精确性造成影响^[8~10]. 笔者充分考虑了此方法的利弊关系,认为根去除法虽然存在一定的不足,但这些不足之处可以通过在试验过程中采取一定的措施加以改进,以最大限度地降低试验误差. 因此,本研究于 2004 年秋季开始进行野外试验的相关准备工作,于 2005 年生长季进行了系统研究.

1 试验地自然概况与研究方法

1.1 试验地自然概况

本试验的采样点位于内蒙古锡林河流域,该地区属中温带干旱、半干旱大陆性季风气候,具有“寒冷、风大、雨少”的气候特征,全年大风(> 17.3 m/s)

日数约 71 d,年平均气温 - 0.4℃,最冷月 1 月的平均气温为 - 22.3℃,最热月 7 月的平均气温为 18.8℃,降水量年际变化较大,多雨年份可达 500 mm,干旱年份则少于 200 mm,多年平均降水量为 350 mm,且主要集中在 7~9 月(占全年降水的 60%~80%). 研究中选择羊草(*Leymus chinense*)自由放牧草原(116°04'E,43°26'N)、大针茅(*Stipa grandis*)自由放牧草原(116°32'E,43°44'N)和羊草退化草原(116°43'E,43°36'N)作为主要研究对象,其中,前 2 个样地均为常年自由放牧草场,放牧强度为 5~8 只羊/hm²,属过度放牧状态,羊草退化草原放牧强度为 10~15 只羊/hm²,过度放牧情况更加严重,致使草地呈现严重退化的生态景观,物种组成也发生了显著的变化,其中冷蒿(*Artemisia frigida*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)成为草地退化的主要标志性植物. 由于这 3 个样地在土壤理化性质、群落区系组成和放牧强度等方面均存在显著的差异(表 1),是温带半干旱草原中几个代表性的草地群落类型,因此,本研究结果具有广泛的代表性.

1.2 研究方法

表 1 3 种草地类型的主要自然生态特征及土壤理化特性^[11,12]

Table 1 Main habitat characteristics and relevant physiochemical properties of the three steppes

草地类型	海拔/m	土壤类型	土壤有机质含量/%	容重/g·cm ⁻³	代表植物
羊草自由放牧草原	1 200~1 250	暗栗钙土	1.71	1.09	羊草、大针茅、冰草等
大针茅自由放牧草原	1 100~1 150	典型栗钙土	1.41	1.12	大针茅、杂类草
羊草退化草原	1 150~1 200	暗栗钙土	1.12	1.64	羊草、冷蒿、星毛委陵菜等

本研究于 2004-09 分别在上述 3 个样地进行野外试验的前期准备工作,之所以选择此时,是因为若计划于 2005 年生长季内进行野外土壤总呼吸和去根土壤呼吸速率的野外原位测定,则必须事先将部分采样点内的植物根系全部去除. 9 月份内蒙古草原气温逐渐下降,降水开始明显减少,地上和地下生物量也不断降低,基本不会再有新幼苗的萌发,植物的土壤呼吸作用开始减弱,而温度和水分的下降又不足以使土壤中的微生物停止其代谢活动,因此,选择此时进行根去除工作,能够剔除比较完整的成熟植物根系,同时,将去根的土壤回填后,土壤中的微生物还能够继续进行新陈代谢活动,从而使受到人为扰动的土壤尽量恢复,残存根系也能够得以部分分解. 经过秋末的恢复和 1 个完整冬季的封冻保护,地表厚厚的冰雪层又可以在第 2 a 春季为去根土壤提供充足的水分以供微生物的代谢活动,使土壤的性状得到进一步的恢复. 在生长季来临时,便可以立即着手进行相关的观测工作.

应用根去除法的具体操作方法为:首先,在每个样地选取空间异质性较小、尽量避免人为及动物干扰的样方 6 块(即 6 个重复),每块样方的面积为 1 m×1 m,将地上植被齐地面剪掉,用土铲按 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 共分 5 层将土壤带根取出,分别置于事先准备好的干净塑料布上,在尽量不破坏每层土壤结构的前提下将其中的明显根系去除;然后,在土坑的周围用 50 目的尼龙网包围,在尼龙网内将去根的土壤按照原来的层次回填,以后每月定期观察样方内的变化,若有杂草萌生,则马上去除,使其不能在样方内生长成完整的根系;到 2005-05~2005-09 的生长季内,应用静态箱法每月 2 次在样方内抽取气体,该气体便可以认为是自然状态下去根土壤的呼吸量;测定上述无根土壤呼吸量的同时,在样方外同样选取 6 个样点,去掉地上植被和凋落物,待干扰平衡后与无根土壤的 6 个样方同时取气,并认为此处理下所得到的呼吸量为有根土壤的总呼吸量;最后,通过有根和无根

土壤呼吸量的对比,同时结合根去除法的试验原理,二者的差值即为根系呼吸量。

在每月进行气体取样的同时,还在有根和无根土壤样方内分5层(0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm)用土钻取土并带回实验室分析,以对比有根与无根处理中土壤的水分含量和碳、氮含量,以验证去根土壤的恢复情况。气体的采样与分析方法以及相关因子的测定参见文献[4],采样频率为每月2次。

2 结果与分析

2.1 有根土壤与无根土壤主要水热与理化指标的对比分析

2005 年生长季野外观测开始前,对采样点现场的实际状况进行评估。首先,从表观来看,去根土壤没有受到外界因素的破坏,包括没有老鼠、牲畜破坏的深坑,也没有人为的故意破坏,试验标记保存完好;其次,去根土壤表面没有发现明显的新生幼苗,说明去根工作取得了阶段性的成效;最后,土壤表面有散落的羊粪颗粒和羊蹄践踏的痕迹,说明采样点在未受到明显破坏的前提下也没有和周围环境脱离,属于自然状态下的恢复过程。鉴于上述结果,试验前期工作取得了一定成效,可以继续研究工作。

在温带半干旱草原,温度和水分是影响土壤呼吸最主要的环境因素,同时,温度还决定着研究区域土壤呼吸的季节动态变化,而在温度偏高的夏季,水分则是限制土壤呼吸的最主要因素^[13]。另外,由于土壤呼吸排放的 CO₂ 是植物根系、土壤微生物、土壤动物等共同作用的产物,包括有机碳的分解释放,在本研究中由于去除了土壤中根系呼吸这一重要组分,土壤有机碳的含量就非常重要了。因此,在对本研究区域3个样地有根和无根土壤进行同步取气之前以及随后每次取气的同时,还对各土壤层的土壤水分含量、温度、有机碳含量等进行了测量。如果无根土壤与有根土壤的各项对比指标或与土壤呼吸密切相关的几项指标差异不大,便可以应用根去除法所获得的数据继续进行相关的分析。反之,如果上述指标差异较大,则说明试验设计还存在一定的问题,应该找出原因并进一步加以改进,或者说明应用根去除法进行根系呼吸测定是根本行不通的。

研究中发现,在生长季的不同月份中,无根和有根土壤的各温度指标均显示出很好的一致性(以羊草退化草原的测量结果为例,见表2),这是由于温

度作为1种热能,其传递的介质包括空气、水分和土壤等等,不受时间和空间的限制,只要存在温度的不平衡,就会发生热能的传递,直至平衡。所以,在本试验中出现有根和无根土壤各个土壤层的温度均十分一致的结果。

表2 羊草退化草原有根与无根土壤温度的对比分析
Table 2 Comparison of the soil temperature with root and without root in *Leymus chinensis* degenerated free-grazed steppe

观测日期	0 cm 地温/℃		5 cm 地温/℃		10 cm 地温/℃	
	有根	无根	有根	无根	有根	无根
05-19	22.4	22.0	15.2	14.7	11.3	10.6
06-07	29.3	29.0	21.8	21.4	17.1	16.7
06-20	29.1	30.1	22.4	21.8	18.4	18.2
07-09	31.6	31.7	23.0	22.2	20.2	20.1
07-17	34.5	35.3	27.3	28.2	24.3	24.7
08-07	29.9	30.4	24.8	24.6	22.0	22.1
08-17	24.8	24.4	18.8	18.8	16.4	16.2
09-05	23.2	24.0	19.0	18.2	16.7	16.5

在有根和无根土壤各土壤层水分含量的对比分析中发现,大部分结果无明显差异,说明由于表层土壤和外界接触比较紧密,便于进行气体和水分的交换,使去根土壤的水分含量较易达到自然状态。同时,由于在前期进行人工去除根系时,用网孔细密的尼龙网将土坑四周围住,阻断了土坑周围根系的进入,且不影响土坑内外气体、水分和各种养分、能量的交换,由以上结果看出取得了较好的效果。而对于部分土壤层中有根土壤和无根土壤水分含量的差别(羊草自由放牧草原5~10 cm,大针茅自由放牧草原5~10 cm、20~30 cm土壤层中有根和无根土壤水分含量差异显著),可能是去根后的回填过程中改变了土壤的毛细管原有结构以及土壤的通气状况,造成去根土壤的上下层之间以及和周围土壤的水分流通不够。

在对有根和无根土壤5个土壤层中有机碳含量的对比分析中发现,3个样地基本表现出一致的变化规律,即无根土壤的表层土壤(0~5 cm)有机质含量低于有根土壤表层的有机质含量,而其它土壤层差异不大。分析原因:一方面是去根土壤中缺少了根系的固持作用,土壤有机碳更容易分解,同时,土壤中死根的分解作用近乎停止,使土壤中回归的有机碳减少,造成土壤表层有机质含量偏低;另一方面,本研究中选择3个样地均为过度放牧草原,地表植被的覆盖度小,同时恰逢2005年生长季期间该地区降水量偏少(整个生长季土壤水分含量变化范围为1.83%~7.58%),草地的根系生长并不旺盛,生长后期还曾发生由于过度干旱造成羊在取食过程

中将植物连根拔起的现象,因此,草地根系的固持作用并不十分明显. 结合上述 2 方面的原因,虽然各样地 0 ~ 5 cm 有根和无根土壤有机质含量有所差异,但差异并不显著(表 3). 而 3 样地 5 ~ 30 cm 各土层中均表现出去根土壤和有根土壤有机质含量接

近的规律,说明土壤在人为去根的扰动后,较长时间的恢复起到了一定的作用,同时,这部分土壤层的土壤不能直接与外界接触,温度与水分的差异也不十分显著,所以矿化分解速率相差不大.

2.2 土壤总呼吸与相关环境因子的统计分析

表 3 3 种放牧草原有根和无根土壤水分和土壤有机碳含量的差异显著性检验¹⁾

Table 3 Test of the significance of difference on soil water content and soil organic carbon content with and without root in the three grazed steppes

土层深度/cm	羊草退化草原		羊草自由放牧草原		大针茅自由放牧草原	
	水分含量	有机碳含量	水分含量	有机碳含量	水分含量	有机碳含量
0 ~ 5	0.827	0.085 *	0.999	0.064 *	0.397	0.883
5 ~ 10	0.081	0.323	0.007 *	0.689	0.045 *	0.738
10 ~ 20	0.627	0.127	0.117	0.199	0.092	0.386
20 ~ 30	0.365	0.473	0.084	0.261	0.035 *	0.662
30 ~ 40	0.402	0.329	0.181	0.029 *	0.323	0.703

1) 数值为均值差异比较中双尾 *t* 检验的显著性概率, * 代表在 0.05 水平下差异性显著, *n* = 48

在应用根去除法进行土壤总呼吸与根系呼吸的区分研究时,最主要的问题是能否保证去根土壤中各项理化指标与有根土壤保持基本一致,进而保证去根土壤中排放的 CO₂ 能够近似代表土壤的净呼吸速率. 为此,在详细对比分析 3 个样地有根和无根土壤中相关土壤性状差异的基础上,还十分有必要了解控制有根土壤呼吸的主导因子,然后,结合去根土壤与有根土壤在这些方面存在的异同,进一步确定应用根去除法推算土壤中根系呼吸的可靠性和准确性.

本研究分别将羊草退化草原、羊草自由放牧草原和大针茅自由放牧草原的土壤总呼吸速率与其相应的各环境因子(包括土壤水分含量、各土壤层温度、土壤有机碳含量和土壤全氮含量等)进行相关分

析,研究发现(表 4),3 个样地中的土壤总呼吸速率与土壤表层土壤水分含量(0 ~ 5 cm)呈线性正相关,且相关性显著,说明土壤表层(0 ~ 5 cm)水分含量是影响生长季土壤总呼吸的最主要因素,而与其它指标如土壤温度、静态箱内温度、各土壤层有机碳含量和全氮含量等无明显的相关关系. 尽管以往的许多研究表明,温度是影响土壤呼吸的主要环境因子^[14~16],但土壤呼吸对温度变化的响应系数如 *Q*₁₀ 值的大小还取决于温度与土壤水分条件的配置情况^[17],过高或过低的水分含量都会降低土壤呼吸随温度上升而增加的幅度,降低温度的作用效应,从而影响土壤呼吸对温度的敏感性^[18~21],加之本研究区域属于温带半干旱草地类型,降水量偏低,因此,土壤水分含量是限制土壤呼吸最主要的环境因子.

表 4 3 种放牧草原土壤总呼吸与水热因子的相关分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of total soil respiration and climatic factors in the three steppes

样地类型	土壤呼吸与各土壤层水分含量				土壤呼吸与各温度指标			
	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	0 cm	5 cm	10 cm	气温
羊草退化草原	0.74 *	0.45	0.12	0.16	0.24	0.23	0.23	0.24
羊草自由放牧草原	0.79 *	0.31	0.02	0.05	0.27	0.24	0.05	0.58
大针茅自由放牧草原	0.67 *	0.45	0.26	0.28	0.14	0.22	0.29	0.14

1) * 表示在 0.05 水平下相关性显著, *n* = 42

那么,既然已经证明在本研究时段土壤呼吸与温度等环境条件的相关性较弱,则只有去根土壤中的水分含量与有根土壤非常接近,同时其它条件相差不大的情况下,通过去根土壤测得的土壤净呼吸量才是可信的. 从本研究有根与无根土壤各项指标的对比分析中可以看出,研究区域内 3 个样地 0 ~ 5 cm 土壤层中的水分含量基本一致,加之各土壤层的

温度和土壤有机质含量差异并不显著,所以,应用根去除法进行根系呼吸的推算,进而探讨根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系是切实可行的.

2.3 根系呼吸占土壤总呼吸比例的求算

应用根去除法原理,将观测到的土壤总呼吸速率和土壤净呼吸速率相减,即得到根系呼吸速率,进而求出根系呼吸占土壤总呼吸的比例. 在本研究中

(表 5),3 个样地根系呼吸占土壤总呼吸的比例在生长季不同月份最大值为 61.47%(8 月下旬的羊草退化草原),最小值为 19.93%(9 月下旬的羊草自由放牧草原),大部分比例介于 25% ~ 45% 之间,平均值为 35.66%。另外,就不同群落类型与不同放牧强度的 3 个样地而言,这一比例关系基本表现为:羊草退化草原 > 羊草自由放牧草原 > 大针茅自由放牧草原。将此研究结果与应用根系生物量外推法相比较,根系生物量外推法中最大值为 56.06%(7 月下旬的羊草退化草原),最小值为 23.23%(9 月上旬的大针茅自由放牧草原),大部分的比例介于 40% ~ 50% 之间,平均值为 40.30%。

分析造成 2 种研究结果之间的差异,主要与研究方法有关。在本研究中,虽然已经尽量将土壤中的根系去除,但为了减少对土壤结构的扰动,仍会残留部分细小的根系,造成土壤净呼吸速率的测量值偏大。同时,土壤中残存的草籽以及草籽的萌发或

复苏过程也会带来部分 CO₂ 的释放,造成土壤净呼吸速率的测量值偏大,进而使推算的根系呼吸速率减小,最终导致根系呼吸占土壤总呼吸速率的比例偏低。而在应用根系生物量外推法进行根系呼吸及根系呼吸占土壤总呼吸比例的求算过程中,由于假设只有活根系才能进行呼吸作用,事实上死根究竟有无呼吸作用,以及呼吸量占多大比例,目前在学术界尚无定论。同时,在区分活根与死根的过程中活根的损失以及活根与死根的混淆等,使应用根系生物量外推法所求算的根系呼吸速率以及根系呼吸占土壤总呼吸的比值也存在一定的误差。但是,总体来看,上述 2 种方法中不确定性因素的影响均相对较小,与前人的研究结果相对比,本研究已经将根系呼吸占土壤总呼吸的比例限制在 1 个相对精确的范围之内(比值范围在 25% ~ 50% 之间,平均值介于 30% ~ 40% 之间),在草地碳循环的研究中具有较高的应用价值。

表 5 3 种放牧草原土壤各组分呼吸速率及根系呼吸占土壤总呼吸的比例
Table 5 Root respiration, soil microorganism respiration, total soil respiration and the proportion of the root respiration to the total soil respiration of the three steppes

草地类型	观测日期	土壤总呼吸/mg•(m ² •h) ⁻¹	土壤净呼吸/mg•(m ² •h) ⁻¹	根系呼吸/mg•(m ² •h) ⁻¹	根总比例/%
羊草退化草原	05-19	114.03	71.46	42.39	37.18
	06-07	120.86	74.23	46.63	38.58
	06-20	140.17	84.46	55.71	39.74
	07-09	169.41	121.51	47.90	28.27
	07-17	353.14	189.76	163.38	46.27
	08-07	108.80	77.08	31.72	29.15
	08-17	245.68	94.66	151.02	61.47
	09-05	68.43	47.62	20.81	30.41
	09-16	47.33	33.97	13.36	28.23
羊草自由放牧草原	05-20	159.44	94.41	65.03	40.79
	06-08	115.92	67.02	48.91	42.19
	06-21	281.79	171.00	110.79	39.32
	07-08	182.43	129.18	53.26	29.19
	07-18	115.42	86.76	28.66	24.83
	08-08	129.62	88.77	40.85	31.52
	08-18	250.05	121.8	128.24	51.29
	09-06	69.00	52.00	17.00	24.64
	09-17	67.69	54.20	13.49	19.93
大针茅自由放牧草原	05-21	115.94	69.49	46.45	40.06
	06-09	113.70	63.95	49.76	43.76
	06-22	226.25	169.55	56.70	25.06
	07-10	270.65	140.58	130.07	48.06
	07-19	179.07	131.66	47.41	26.48
	08-09	112.88	82.49	30.39	30.39
	08-19	198.07	115.81	82.26	41.53
	09-07	59.05	44.59	14.46	24.49
	09-18	115.94	69.49	46.45	40.06

3 结论

(1) 在应用根去除法对羊草退化草原、羊草自由放牧草原和大针茅自由放牧草原 3 个样地有根土壤与去根土壤各项理化指标的对比分析中, 不同样地 2 个处理间的 0~5 cm 土壤水分含量基本一致, 各土壤层温度也表现出很好的一致性; 去根土壤 0~5 cm 土壤有机碳含量略小于有根土壤, 其余土壤层中的有机质含量差异不大。同时, 通过对原状有根土壤的总呼吸速率与相关环境因子的回归分析发现, 3 样地的土壤总呼吸速率均与 0~5 cm 土壤的水分含量呈显著的线性正相关关系, 而与其它环境因子无明显的相关关系。因此, 在研究区域内应用根去除法进行根系呼吸及根系呼吸占土壤总呼吸比例的推算切实可行。

(2) 根系呼吸占土壤总呼吸的比例在 3 个样地生长季不同月份最大值为 61.47% (8 月下旬的羊草退化草原), 最小值为 19.93% (9 月下旬的羊草自由放牧草原), 大部分比例介于 25%~45% 之间, 平均值为 35.66%。

(3) 与国内外研究者应用其它方法的研究结果相对比, 结合笔者应用根系生物量外推法的研究结果, 此 2 种方法已经能够将根系呼吸占土壤总呼吸的比例限定在 1 个较为精确的范围之内, 在草地碳循环的研究中具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, **44B**: 81~99.
- [2] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(5): 594~602.
- [3] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬. 大气 CO₂ 浓度升高对植物-土壤系统地下过程影响的研究[J]. *土壤*, 2003, **35**(6): 465~472.
- [4] 刘立新, 董云社, 齐玉春. 锡林河流域生长季节不同草地类型根系呼吸特征研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2376~2381.
- [5] Zolt R, John R, Seiler. A method for the *in situ* measurement of fine root gas exchange of forest trees [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, **37**: 107~113.

- [6] Kelting D L, James A. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(7): 961~968.
- [7] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J]. *植物生态学报*, 2002, **26**(1): 29~32.
- [8] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(4): 597~603.
- [9] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞. 土壤各组分呼吸区分方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(2): 65~69.
- [10] David R, Bowling, Diane E. Critical evaluation of micrometeorological methods for measuring ecosystem atmosphere isotopic exchange of CO₂[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **116**: 159~179.
- [11] 李博, 雍世鹏, 李瑶, 等. 中国的草原[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 213~218.
- [12] 齐玉春. 内蒙古草地生态系统生物地球化学循环中主要温室气体通量与碳平衡[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003. 61~62.
- [13] 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征[J]. *科学通报*, 2005, **50**(5): 473~480.
- [14] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 217~227.
- [15] Ye Q, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: Nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modeling*, 2002, **153**: 131~142.
- [16] Chen Q S, Li L H, Han X G. Effects of water content on soil respiration and mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5): 972~978.
- [17] Lavigne M B, Foster R J, Goodine G. Seasonal and annual changes in soil respiration in relation to soil temperature, water potential and trenching[J]. *Tree Physiology*, 2004, **24**: 415~424.
- [18] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri [J]. *Ecology*, 1971, **52**: 912~915.
- [19] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1984, **48**: 1267~1272.
- [20] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effect of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of eastern Amazonian[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 53~69.
- [21] Xu L K, Baldocchi D D, Tang J W. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2004, **18**: 1029~2281.