

沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态

宋长春^{1,2}, 王毅勇¹, 阎百兴¹, 姜彦景¹, 赵志春¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100083)

摘要:三江平原沼泽湿地的垦殖对土壤环境产生了一定的影响. 沼泽湿地开垦前, 6~9 月湿地表层土壤(10cm) 温度均值为 $12.72\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 明显低于垦后农田($16.71\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3.81\text{ }^{\circ}\text{C}$). 湿地垦殖后土壤温度的增高及氧化-还原条件的改变, 促进土壤有机质的分解和土壤呼吸通量的增大, 垦后农田 8~9 月土壤平均呼吸通量 [$946.36 \pm 195.78\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 是天然沼泽湿地 [$153.75 \pm 82.59\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 的 6 倍. 土壤有机碳及氮素含量随湿地开垦及开垦年限的增加而降低, 沼泽湿地开垦初期 5~7a, 土壤有机碳及其它营养元素的含量变化幅度较大, 持续耕作 15~20a 后, 土壤有机碳损失曲线趋于相对稳定值. 土壤有机质输入量的减少及分解作用加强导致土壤持水量降低, 其变化趋势与土壤有机碳损失趋势相一致.

关键词:沼泽湿地; 垦殖; 土壤有机碳; 氮; 水热条件

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)03-0150-05

The Changes of the Soil Hydrothermal Condition and the Dynamics of C, N after the Mire Tillage

SONG Chang-chun^{1,2}, WANG Yi-yong¹, YAN Bai-xing¹, LOU Yan-jing¹, ZHAO Zhi-chun¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The wetlands gain increasing attention to its crucial ecological and environmental function. The tillage of the mires in the Sanjiang Plain has played the important role in regulation of the region ecological balance and climate. Prior to tillage, the mean soil temperature of the topsoil (10cm) in mire from June to September was $12.72\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, distinctly lower than that of the tilled soil, which was $16.71\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3.81\text{ }^{\circ}\text{C}$. However, the daily mean evaporation of $4.87\text{ mm} \pm 3.78\text{ mm}$ in the mire was larger than that of the tilled soil with mean soil temperature of $2.66\text{ mm} \pm 3.78\text{ mm}$ from May to September. The alteration of the oxidation-reduction condition and the augment of the soil temperature led to the increases of soil organic matter (SOM) decomposition ratio and the soil respiration flux, the mean soil respiration (CO_2) flux [$946.36 \pm 195.78\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] was 6 times larger than that of the mire [$153.75 \pm 82.59\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] from August to September. At the initial stage (5~7a) of the mire tillage, the SOM and the nutrients levels change significantly, but after the 15~20a of continuous cultivation, the SOM loss curve came to a relative stable value. The lessen of the input and strength of the decomposition rate of SOM resulted in the accretion of soil bulk capacity and specific gravity, its changing trend was similar to the changing of the soil organic carbon (SOC) loss.

Key words: mire; tillage; soil organic carbon; nitrogen; hydrothermal condition

湿地是陆地生态系统的重要组成部分,在维护区域生态平衡、生物多样性保护及碳的储存中起着重要作用^[1,2]. 由于气候变迁和人类活动的增强,全球湿地面积迅速减少,人类活动干扰了湿地生态系统正常的物质循环过程,尤其是湿地开垦为农田后,植物残体及沉积泥炭分解速率提高,碳的释放量增加,改变了湿地生态系统的碳循环模式,湿地生态系统的演变可能是全球大气 CO_2 含量升高的一个不可忽视的重要因素. 三江平原是我国沼泽湿地分布面积最大的地区,也是近 50 年来湿地开垦面积最大的地区,区内耕地面积已由 1949 年的 $78.8 \times 10^4\text{ hm}^2$,增加到目前的 $524 \times 10^4\text{ hm}^2$. 由于沼泽湿地的大面积开垦,沼泽湿地植被破坏,土壤侵蚀作用加强^[3],土壤肥力下降,湿地大规模开垦已对区域生

态平衡、区域气候环境等产生了重要影响^[4].

农业生产活动导致土壤中大部分有机质的损失,在过去的 200a 里,随着全球农业用地面积的不断增长,引起土壤有机碳贮量的不断减少,而进入大气中的碳不断增加,其极大地影响到大气中 CO_2 的浓度和全球碳平衡^[5],同时,土壤中氮素的损失造成土壤肥力下降^[6],土壤有机碳是土壤质量的核心,也是营养元素生物地球化学循环的主要组成部分,其质量和数量影响和控制着植物初级生产量,而这种变化与土壤水热条件变化密切相关,深入认识

收稿日期: 2003-05-17; 修订日期: 2003-08-18

基金项目: 中国科学院创新工程重大项目资助 (KZCX1-S-W-01; KZCX3-S-W-332; KZCX1-S-W-19)

作者简介: 宋长春(1968~),男,博士,研究员,主要从事湿地生物地球化学研究, E-mail: Songcc@mail.neigae.ac.cn

不同环境条件下土壤有机碳动态变化及其控制过程,是实现土地资源可持续利用的重要基础.土壤呼吸是土壤碳动态的关键控制因子,就全球规模而言,陆地生态系统土壤呼吸通量(C)估计为 50 ~ 75 Pg·a⁻¹^[7],约占大气 CO₂ 库的 10 %^[8].土壤呼吸通量综合反映了植物根和土壤微生物的活性及土壤中碳的代谢作用等^[9],决定土壤碳循环的速率.

本项研究的目的是认识沼泽湿地垦殖后土壤水、热条件的变化及对土壤有机碳含量和土壤呼吸通量的影响,评价已垦农田土壤有机碳、氮素等变化趋势.

1 材料与方法

本项研究工作选取三江平原别拉洪河与浓江河间地带(E133°31', N47°35'),分布有大面积沼泽湿地及近 40a 开垦历史的农田.区内海拔 55.4 m ~ 57.0 m,平均年降雨量 550 mm,区内天然湿地主要有常年积水沼泽和季节性积水沼泽,主要湿地植被有毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)、乌拉台草(*Carex meyeriana*)和小叶章(*Doyeuxia augustifolia*)等.区内分布的不同开垦年限的农田主要是由沼泽湿地和沼泽化草甸垦殖而成,主要种植作物为大豆和水稻.本工作重点选取不同开垦年限的旱作农田土壤为主要研究对象.

首先选取不同开垦年限耕地及周边天然湿地和弃耕地,对比分析土壤剖面与植被特征差异,并采集土壤样品,实验室利用 FLASH1112 CNS 元素分析仪测定有机碳及全氮含量,其它测试项目采用常规测定方法,利用小气候观测系统监测气温、土壤温度等环境因子变化.气温数据利用三江平原沼泽湿地生态试验站气象站观测资料.另外,在沼泽湿地、开垦 7a、15a 农田及弃耕 5a 农田试验场,布置 4 个土壤呼吸通量观测点,利用不透明箱采集气体样品.在 30 min 时间内,用 100 mL 针管采集 4 次气体样品,24 h 内在实验室用 HP4890 气相色谱仪测定 CO₂ 浓度,CO₂ 气体浓度检测器为离子火焰化检测器(FID).气体通量采用以下公式计算:

$$J = \left| \frac{dc}{dt} \right| \frac{M}{V_0} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} H$$

式中, J 为气体通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; dc/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率; M 为被测气体摩尔质量; p 为采样点气压; T 为采样时绝对温度; V_0 、 T_0 、 p_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积、空气绝对温度和气压; H 为水面以上采样箱高.

2 结果与讨论

2.1 沼泽湿地开垦前后土壤水、热条件变化

沼泽及沼泽化草甸在植物生长季常年或有季节性积水,土壤处于水分过饱和或饱和状态,湿地开垦后,由于沼泽被排水疏干,多年积水和季节性积水消失,地下潜水位降低,沼生、湿生植物被农作物所代替,导致土壤水文特征发生较大变化,湿地开垦 7 年后,土壤饱和持水量(最大田间持水量)及毛管饱和持水量下降近 50 %左右(图 1).这主要是由于湿地开垦后,由于水文条件变化,土壤植物残体及土壤有机质的分解速率增大,随着土壤有机质的不断分解,土壤容重和比重加大,毛细孔隙及非毛细孔隙减少,导致土壤饱和持水量等的不断降低.另外,三江平原地处季节性冻融区,沼泽湿地与农田土壤冻融作用在时间上存在一定的差异(图 2),垦后农田 100 cm

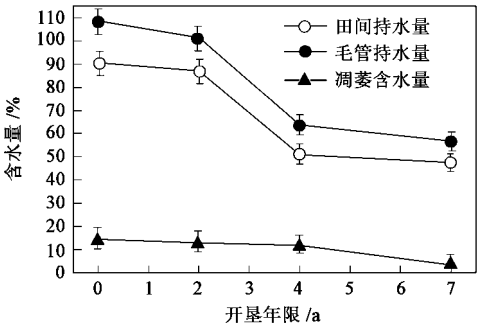


图 1 沼泽湿地开垦前后土壤含水量变化

Fig.1 Changes of soil water content after mire tillage

土壤层 5 月中旬基本融通,而湿地土壤则在 7 月中旬全部融通,因此湿地的开垦将导致水平衡要素在

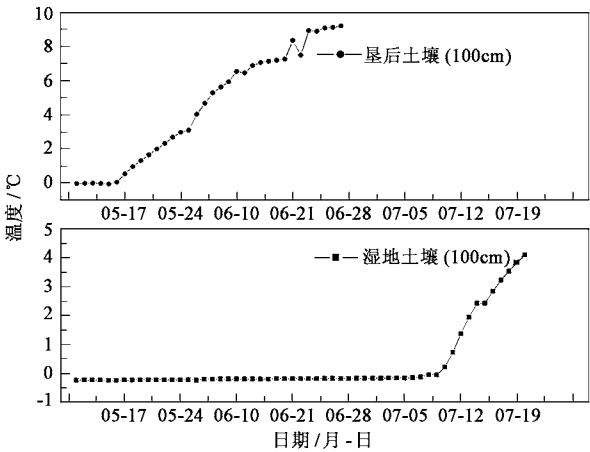


图 2 沼泽湿地及垦殖后土体(100cm)融冻期变化

Fig.2 Difference of the melting time of the frozen soil (100cm) between mire soil and the tillage soil

时空分布上的变化。

同时,湿地开垦后,由于土壤水文条件的变化,土壤温度也发生较大变化(图3),6~9月湿地上层土壤(10cm)温度均值为 $12.72^{\circ}\text{C} \pm 4.12^{\circ}\text{C}$,明显低于垦后农田($16.71^{\circ}\text{C} \pm 3.81^{\circ}\text{C}$)。以2002-07-15为例(图4),在相同气温条件下,沼泽湿地5cm深土壤日平均温度为 16.02°C ,最高为 18.08°C ,而农田土壤(0~5cm)日平均温度为 20.71°C ,最高达 25.97°C ,土壤日平均温度相差 4.69°C ,随着土壤深度增加,土壤日平均温度及温度波动幅度减小,但根层(0~20cm)土壤温度差值仍高达 3.36°C ,这样的温度条件将促进土壤有机质的分解及提高土壤的呼吸强度。

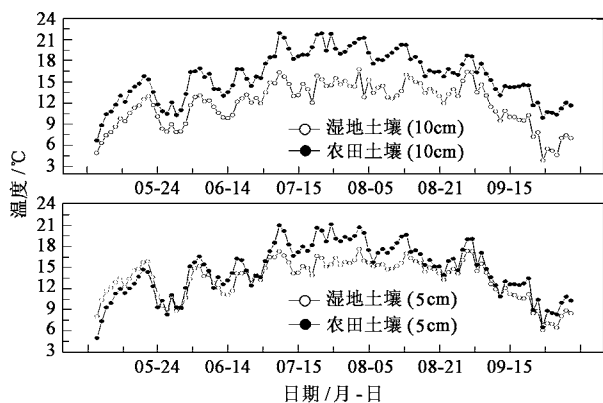


图3 沼泽湿地及垦殖后土壤温度季节性变化曲线

Fig.3 Seasonal change of the mire soil and the tillage soil temperature

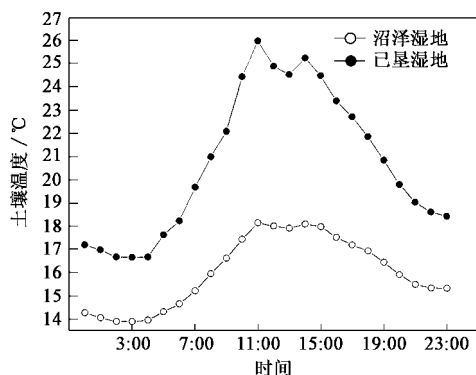


图4 沼泽湿地与垦殖后土壤(5cm)温度日变化(7月15日)特征

Fig.4 Daily change of the mire soil and tillage soil (5cm) temperature(15, July)

2.2 湿地开垦后土壤有机碳、氮素含量变化

土壤有机碳是土壤质量的决定因素,其影响土壤的物理、化学和生物特征及其过程,土壤有机碳的积累主要由土壤有机质的输入与不同类型碳矿化速

率间的净平衡决定。土壤有机碳含量降低将引起土壤持水力下降,侵蚀作用增强,同时导致温室气体排放量增加。湿地开垦后,土壤有机碳含量变化,可反映土壤系统的演化趋势,而氮素损失造成土壤肥力下降。图5、6综合反映了湿地开垦不同年限土壤有机碳及氮素含量变化趋势,可以看出,在湿地开垦初期的5~7a,土壤有机碳及氮素损失较快,15~20a后有机碳损失曲线趋于平缓,表明湿地开垦后,土壤经过稳定而长期的耕作,土壤有机碳将趋于一个相对的稳定值。土壤氮素含量变化曲线与土壤有机碳相似,反映了二者间存在密切的相关关系。

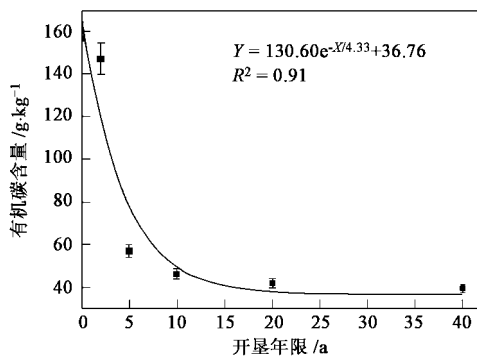


图5 湿地开垦后土壤有机碳含量变化曲线

Fig.5 Change of the soil organic carbon levels after mire tillage

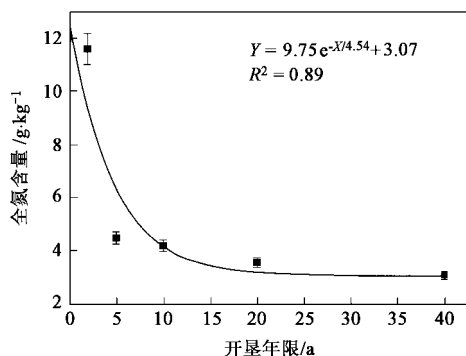


图6 湿地开垦后土壤氮素含量变化曲线

Fig.6 Change of the soil nitrogen levels after tillage

三江平原湿地类型以草本沼泽为主,湿生植物具有较高的生产力,如区内毛果苔草沼泽,植物年净初级生产力高达 $1318.9\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,土壤有机质的输入量大于分解量,土壤有机碳的含量一般高于5%。湿地开垦为农田后,土壤有机质的输入量大大减少,而土壤有机质的分解速率和侵蚀作用增加,其必然会导致土壤中有机碳含量的不断减少。另外,湿地开垦后,土壤剖面养分物质含量也发生明显的变化

(表 1),其中以根层土壤(0~20cm)有机碳、氮及速效钾变化幅度最大,全磷和全钾的变化幅度相对较小,营养元素的垂向分异明显,同时,湿地开垦后土壤 pH 值略有增大.

表 1 湿地开垦后土壤剖面营养元素含量变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Change of the soil nutrients levels after mire tillage/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

采样类型	深度/cm	有机碳/%	全氮	全磷	全钾/%	速效氮	速效磷	速效钾	pH 值
草甸沼泽	0~5	4.16	4531.12	1636.17	0.989	277.20	16.18	264.38	5.50
	10~15	2.90	1091.53	1147.71	1.164	218.40	29.31	120.91	5.61
	30~40	0.86	905.24	1198.65	1.193	75.60	17.44	194.42	5.63
	0~5	3.27	3137.76	1330.20	1.212	237.60	22.29	196.65	5.70
开垦 7 a 农田	10~15	1.30	1352.96	899.25	1.371	97.44	17.26	176.64	6.13
	30~40	1.02	694.24	1150.96	1.375	65.52	15.28	199.53	6.33
	0~5	1.61	1293.20	1045.82	1.305	147.84	15.10	178.32	6.17
开垦 15 a 农田	10~15	1.44	1196.74	967.91	1.362	126.00	15.46	73.16	6.03
	30~40	1.30	600.54	773.12	1.544	100.80	14.38	76.03	6.02

2.3 湿地开垦前后土壤呼吸通量变化

湿地开垦后,由于植物类型及水热条件发生了较大变化,有机碳的输入及土壤微生物的活性也会产生相应的变化,另外,湿地开垦前后土壤的小气候环境也存在较大的差异,这是导致土壤呼吸作用强度差异的主要原因.

土壤呼吸作用变化可作为土壤演化或退化的重要指标,也可用以评价土壤有机碳的输入质量.图 7 综合反映了三江平原湿地开垦前、后土壤呼吸通量

毛果苔草沼泽湿地土壤有机质的输入量较大,但植物生长季常年积水,土壤长期处于厌氧环境,有机质的分解率低,且根层土壤温度低于农田土壤,因此土壤呼吸通量小于其它类型土壤.

另一方面,已垦湿地农田土壤呼吸通量表现出明显的季节性变化(图 8),8 月份是农作物的主要生长期,土壤根系最为发达,同时植物生物量也达到一年的最高值,因此,在此期间土壤呼吸通量最大.生态系统的小气候环境对土壤呼吸通量的季节性变化也具有重要影响,主要表现在对土壤温度、植物有效光合辐射(PAR)及其它生长要素的影响,而植物类型及生长状况决定土壤小气候环境,土地利用方式及土壤结构决定植物残体的输入数量和质量及植物根的发育情况.湿地开垦后,植被类型和结构等都发生了根本变化,有机质的输入量及土壤小气候环境也产生了较大变化,由此会导致湿地开垦前后土壤呼吸通量的较大差异.

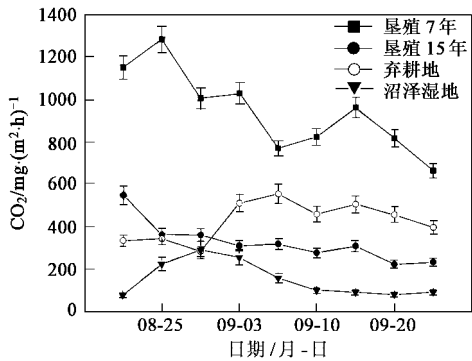


图 7 沼泽湿地开垦前、后土壤呼吸通量对比

Fig.7 Difference of the soil respiration flux between mire soil and tillage soil

变化,垦后农田 8~9 月土壤平均呼吸通量[$(946.36 \pm 195.78) \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]是天然沼泽湿地[$(153.75 \pm 82.59) \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]的 6 倍.由图 7 可以看出,湿地开垦初期阶段,土壤呼吸通量最大,而随着开垦年限的增长土壤呼吸通量表现出明显减小的趋势,但农田弃耕后,由于土壤有机质的输入量增加,且有较好的水热条件,因此土壤呼吸强度大于耕作土壤.

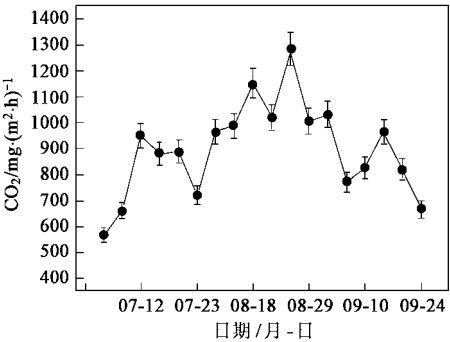


图 8 已垦湿地农田土壤呼吸通量季节性变化特征

Fig.8 Seasonal change of the soil respiration flux after tillage

多数研究者认为,温度是与土壤 CO_2 通量和生态系统碳交换关系最密切的非生物因子^[10,11],但也有研究者认为温度与土壤 CO_2 通量呈弱的相关关系,但受光照辐射条件的影响较大^[12],本项研究工作证实了湿地及垦殖后农田土壤呼吸通量与土壤温度(0~5cm)呈正相关关系.

3 结论

三江平原是我国沼泽湿地最大的集中分布区,也是近 50 年来沼泽湿地开垦面积最大的地区.湿地开垦后,由于水文条件、植物类型、结构及生产力等发生了较大的变化,土壤生态环境及其演化趋势也随之产生显著变化,主要表现在土壤有机碳、氮素含量及土壤持水能力等的降低,侵蚀作用增强等.湿地开垦前后,土壤生态环境差异产生的主要驱动因子是水热条件的变化,土壤有机质的减少和分解速率增大是垦殖后土壤退化的主要因素,垦殖后土壤温度增高,呼吸通量明显大于湿地土壤.在湿地开垦初期的 5~7a,土壤有机碳及其它营养元素变化幅度较大,经过 15~20a 稳定耕作后,土壤有机质含量趋于一个相对的稳定值,土壤呼吸通量也明显减小.

参考文献:

[1] Howarth R W, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N and P fluxes for the drainages to the North Atlantic ocean: natural and human influences[J]. *Biogeochemistry*, 1996, **35**:75~139.

[2] Franzen L G. The earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect[A]. *International Peat Society Proceedings of International Peat Congress*. Uppsala: 1992,1~18.

[3] 刘兴土,马学慧. 三江平原大面积开荒对自然环境影响及区域生态环境保护[J]. *地理科学*, 2000, **20**(1):14~19.

[4] 阎敏华,邓伟,马学慧. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化[J]. *地理学报*, 2001, **56**(2):159~169.

[5] Sellers P J, *et al.* Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere[J]. *Science*, 1997, **275**:502~509.

[6] Pimentel D, *et al.* Environment and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. *Science*, 1995, **267**:1117~1123.

[7] Houghton R A, *et al.* Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, **12**:25~34.

[8] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**:71~90.

[9] Schesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**:7~20.

[10] Boone R D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, **396**:570~572.

[11] Ryan M. Effects of climate change on respiration[J]. *Ecological Applications*, 1991, **1**:157~167.

[12] Fitter A H, *et al.* Root production and turnover in an upland grassland subjected to artificial soil warming respond to radiation flux and nutrients, not temperature[J]. *Oecologia*, 1999, **120**:575~581.