

哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤温度时空分布 对模拟增温的响应*

张一平^{1,2**} 武传胜^{2,4} 梁乃申³ 沙丽清^{1,2} 罗鑫² 刘玉洪^{1,2}

(¹中国科学院热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223; ²中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南景东 676209; ³日本国立环境研究所, 日本筑波 305-8506; ⁴中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为把握森林不同深度的土壤温度对区域气候变暖的响应, 评估气候变暖对亚热带森林土壤呼吸的影响, 利用在哀牢山亚热带常绿阔叶林中设置的土壤增温和土壤呼吸人工控制实验, 对 2011—2013 年的对照样地和增温样地不同深度的土壤温度实测数据进行了分析, 结果表明: 区域气候变暖导致的温度升高不改变土壤温度的年变化和日变化特征; 干季的增温效应大于雨季; 同一深度增温效应具有一定的年变化, 但日变化不明显; 增温效应在土壤表层较大, 1—4 月明显, 2 月最高, 增温可达 3 °C; 5 cm 深度的平均增温效应在 2 °C 左右, 且年变化较小; 随着深度的增加, 增温效应呈现对数降低趋势; 如果以 0.5 °C 为增温效应的阈值, 推算可得出: 干季的影响深度为 3.82 m, 雨季可达 12.04 m, 年均均为 6.58 m。

关键词 全球变化; 土壤温度; 土壤增温; 亚热带常绿阔叶林

中图分类号 P463.22 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)2-0347-05

The response of soil temperature to experimental warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan, SW China. ZHANG Yi-ping^{1,2**}, WU Chuan-sheng^{2,4}, LIANG Nai-shen³, SHA Li-qing^{1,2}, LUO Xin², LIU Yu-hong^{1,2} (¹*Key Laboratory of Tropical Forest Ecology (Xishuangbanna Tropical Botanical Garden), Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China*; ²*Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Jingdong 676209, Yunnan, China*; ³*National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan*; ⁴*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(2): 347-351.

Abstract: To improve our understanding of responses of soil temperature to global warming in forests, we conducted a soil warming experiment in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan, SW China. Based on measurements from 2011 to 2013, we examined warming effects on seasonal and diurnal patterns of soil temperature. The results showed that warming effects in dry season were greater than in rainy season, showing seasonal variations, but not diurnal variations. Soil-surface temperatures increased between January and April, with a 3 °C maximum in February. Warming increased soil temperature by 2 °C at the soil depth of 5 cm. The warming effect decreased exponentially with soil depth. Based on a 0.5 °C temperature increase, soil warming could reach the depth of 3.82 m in the dry season, 12.04 m in the rainy season, with an annual mean of 6.58 m.

Key words: global warming; soil temperature; experimental soil warming; subtropical evergreen broad-leaved forest.

* 云南省自然科学基金重点项目(2011FA025)、国家自然科学基金-云南省基金联合项目(U1202234)、国家自然科学基金重大项目(31290220)和中国科学院战略性先导专项(XDA05050601和XDA05050206)资助。

** 通讯作者 E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2014-06-23 接受日期: 2014-09-05

目前,全球气候变化乃是世界关注的问题。IPCC(2007)第4次评估报告指出:在过去的100年里全球平均温度升高了 $0.74\pm 0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$;其 CO_2 的增温效应已经被公认。森林土壤的碳贮量约占全球土壤的71%,其中热带和亚热带森林的碳贮量约占全球土壤的25%(Dixon *et al.*, 1994; Kauppi, 2003),以森林土壤为主的土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,达15500亿t,是大气中碳储量的2倍,是全球植被的3倍(Lal, 2004)。随着森林破坏,土壤 CO_2 等温室气体的排放增大,已成为仅次于化石燃烧的温室气体重要排放源(Dixon *et al.*, 1994)。由此可见,森林生态系统在全球碳循环与平衡中具有极为重要的和不可替代的地位和作用。而在森林生态系统中土壤-植被-大气间物质交换,特别是森林生态系统的碳收支对全球气候变化的影响与反馈作用,已经成为全球变化和可持续发展研究的关键问题之一。

近10年来国内外关于全球变化对陆地生态系统功能特性和土壤理化性状影响的模拟实验已开展,但多是设置在农田和草地(Klein *et al.*, 2004; Wan *et al.*, 2005; 牛书丽等, 2007; 韩雄等, 2008; Kimball *et al.*, 2008; Xia *et al.*, 2009),其研究取得了可喜的成绩;但是对于作为全球陆地碳循环主体的森林生态系统的野外生态学控制实验报道尚不多见,仅见川西亚高山人工云杉林使用原位OTCs模拟增温方法进行的模拟实验(潘新丽等, 2008),以及持续性主动增温对中亚热带森林土壤呼吸影响(陈仕东等, 2013)。

哀牢山亚热带常绿阔叶林分布区域的山地具“冬暖夏凉”气候特征,山地垂直地带性与纬向水平地带性存在分异,导致该地区具较高地温(刘玉洪, 1991, 1992, 1993),林内各深度土壤温度均呈显著上升的趋势,且上升趋势高于林外(You *et al.*, 2012)。林内各层地温均低于同层的林外地温,其年变幅和日变幅也小于林外(余雷等, 2012)。森林地上地下的碳分配对土壤有机碳具有影响(冯文婷等, 2008; Feng *et al.*, 2009a, 2009b; Schaefer *et al.*, 2009)。对森林碳平衡的研究表明(Tan *et al.*, 2011),亚热带常绿阔叶林虽然已是300多年的老龄林,但仍是一个较大的碳汇;且温暖化将极大的促进亚热带常绿林的土壤呼吸作用,伴随着温度的上升,亚热带常绿林的碳汇作用将不断变弱(Tan *et al.*, 2012);伴随全球变暖,将影响森林土壤碳排放,导致森林碳平衡发生

改变。因此,在全球气候变暖情境下,森林土壤温度时空分布特征及其变化规律是否发生改变?特别是区域气候变暖,会对多深的土壤温度产生影响?不同季节的影响状况又如何?乃是关注的问题。

本研究选择我国哀牢山亚热带山地常绿阔叶林为研究对象,通过设置人工控制增温实验,采用原地人工控制增温的方式,模拟温度升高后,对森林土壤温度时空分布特征、变化规律的改变开展对比研究,揭示区域变暖对森林不同深度的土壤温度的影响状况,定量把握不同季节受影响土壤温度的深度,为探讨区域气候变暖后森林土壤呼吸的变化,以及森林碳循环评估提供支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

研究样地位于中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站——云南省景东县哀牢山自然保护区试验区的徐家坝地区($24^{\circ}32'N$ 、 $101^{\circ}01'E$;海拔2400~2600 m)。年平均气温 $11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月(7月)平均气温 $15.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月(1月)平均气温 $5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。一年中干湿季分明,年降雨量为1881.5 mm,其中雨季(5—10月)为1607.3 mm,干季(11月—翌年4月)为274.2 mm。该地区的土壤为山地黄棕壤,地表几乎被厚度为3~7 cm的凋落物所覆盖;土壤腐殖质呈棕黑色,厚达10~15 cm;矿质土层质地疏松,以团粒结构为主;表土层透水性良好,涵养水的能力很强;有机质含量较高,土壤呈酸性($\text{pH}<5$)。木果柯(*Lithocarpus xylocarpus*)、硬壳柯(*Lithocarpus hancei*)和变色锥(*Castanopsis rufescens*)等乔木为样地主要树种,灌木层多生无量山箭竹(*Sinarundinaria nitida*),草本层主要生细梗苔草(*Carex teinogyne*)和蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)。

1.2 研究方法

采用人工控制增温实验,共使用20个呼吸箱(长90 cm×宽90 cm×高50 cm),设置对照、增温、切根和去凋落物4种处理(每种处理5个重复)。20个呼吸箱的测定循环为1 h,每个呼吸箱的测定时间为3 min。土壤呼吸的测定方式为闭路式,使用红外 CO_2 测定仪(Li-820, Li-Cor)测定。本研究模拟未来温度升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,增温采用碳素红外辐射器作为人工土壤增温处理的热辐射源。由45 cm长的碳棒红外辐射器(800 W)和一个宽度为15 cm的拱形热反射(防雨)板组成,对照处理和增温处理在不同深度

(0.5、5、10、20 和 40 cm) 设置了温度传感器,测定各层的土壤温度。

1.3 数据处理

人工控制实验于 2010 年 10 月设置,在 2010 年 12 月底开始实施增温。本研究使用了 2011—2013 年对照处理和增温处理不同深度(0.5、5、10、20 和 40 cm)的土壤温度数据进行分析。将增温处理土壤温度减去对照处理土壤温度,得到的温差,可以视为土壤温度对气候变暖的响应。

利用不同月份和季节的土壤增温数值与深度进行拟合,可以得到土壤增温效应与土壤深度的拟合方程:

$$\Delta T_s = a \ln D + b \quad (1)$$

式中: ΔT_s 为土壤增温效应($^{\circ}\text{C}$), D 为土壤深度(cm,绝对值); a 、 b 为系数。为了估算土壤增温效应的影响深度,设定 $\Delta T_s \geq 0.5$ $^{\circ}\text{C}$ 为具有增温效应(即取 $\Delta T_s = 0.5$ $^{\circ}\text{C}$ 为阈值),计算可以得到各月的影响深度。

2 结果与分析

2.1 不同深度的土壤温度日变化特征

图 1 表明,对照处理与增温处理均具有相似的日变化特征,且其日变化均表现为土壤表层较大(08:00 最低,17:00 最高),5 cm 以下土壤温度的日变化逐渐减小,但增温处理下不同层次土壤温度明显高于对照区。表明,区域变暖,可以改变不同深度的土壤温度,但不会改变土壤温度的日变化特征。

2.2 土壤温度时空分布特征

不论是对照处理,还是增温处理(图 2),土壤温度均呈现出相似的时空变化规律,干季土壤温度均

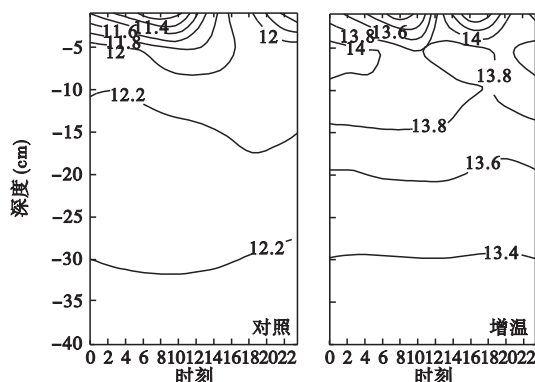


图 1 不同深度土壤温度的日变化
Fig.1 Diurnal variations of soil temperature

较低,雨季均较高,平均土壤温度 1 月最低,7 月最高;土壤温度的垂直变化梯度干季较小,雨季较大。

2.3 不同深度土壤温度对气候变暖的响应

图 3 表明,土壤表层的增温效应较明显;午后略大于午前;伴随深度的增加,增温效应呈现减小的趋势,但即使到 40 cm 深度,增温效应也达 1.0 $^{\circ}\text{C}$ 以上;而增温效应日变化也仅呈现在土壤表层;深层土壤增温效应则没有明显的日变化。

图 4 显示,增温效应同样是土壤表层较显著,伴随深度增加,土壤增温效应减小;在 1—4 月土壤表层的增温效应较高,高于 2.4 $^{\circ}\text{C}$,2 月可达 3.0 $^{\circ}\text{C}$;5—10 月稍低;5 cm 的增温效应约一年中基本上在 2 $^{\circ}\text{C}$ 左右(2 月最大,12 月最小);即使到 40 cm 深度,增温效应也达 1.0 $^{\circ}\text{C}$ 以上(图 3,图 4)。

不同季节的土壤增温效应与土壤深度呈现较好的对数关系(图 5),土壤增温效应与土壤深度具有很好的相关关系(表 1)。用公式 1 估算了不同月份土壤温度增温效应的影响深度(图 6),可见:6—9

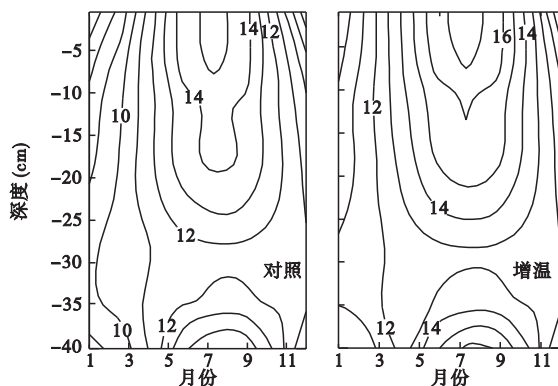


图 2 土壤月平均温度的时空变化
Fig.2 Temporal and spatial variation of monthly soil temperature

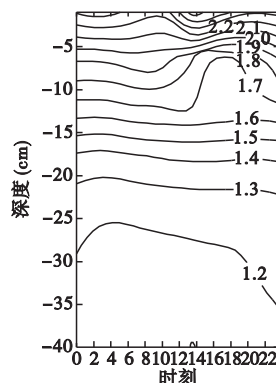


图 3 增温效应的日变化
Fig.3 Diurnal variations of warming effects

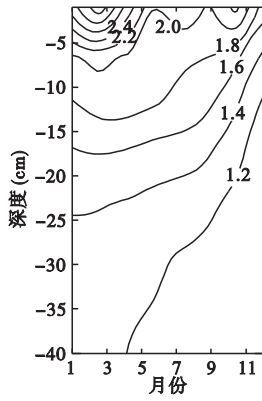


图4 增温效应的时空变化

Fig.4 Temporal and spatial variation of warming effects

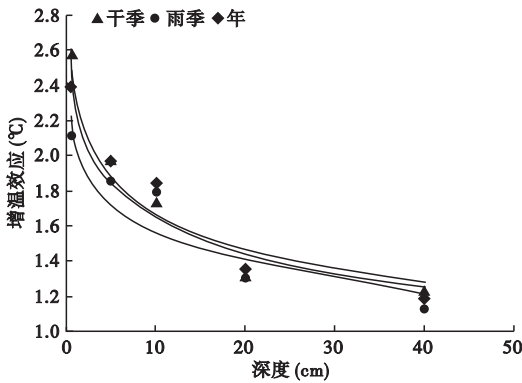


图5 土壤增温效应与深度的相关关系

Fig.5 Relationship between warming effects and soil depth

月土壤增温效应的影响深度较深,特别是8和9月,其影响深度接近30 m;12月—翌年3月,影响深度较浅,最浅的12月仅为2.04 m;另外,通过计算可以

表1 土壤增温效应与深度回归方程的相关参数

Table 1 Parameters between warming effects and soil depth

月份	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
1	-0.339	2.502	-0.992
2	-0.426	2.957	-0.991
3	-0.405	2.835	-0.937
4	-0.308	2.509	-0.937
5	-0.243	2.095	-0.891
6	-0.205	1.977	-0.878
7	-0.233	2.139	-0.901
8	-0.200	2.097	-0.879
9	-0.182	1.961	-0.893
10	-0.272	2.201	-0.974
11	-0.237	2.009	-0.970
12	-0.196	1.542	-0.918
干季	-0.318	2.393	-0.986
雨季	-0.222	2.078	-0.913
年	-0.277	2.298	-0.961

$\alpha_{0.05} = 0.878; \alpha_{0.01} = 0.959。$

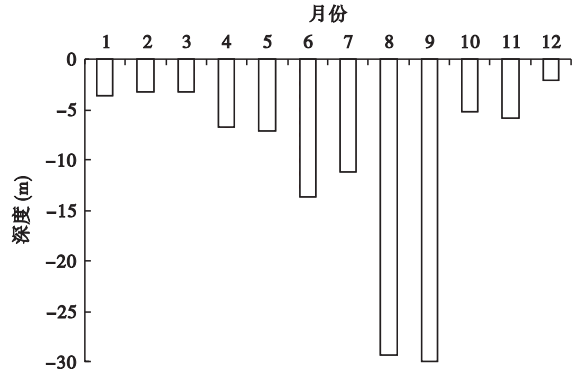


图6 土壤增温效应影响深度的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of depth of warming effect

得到土壤增温效应达 0.5 °C 的影响深度,干季为 3.82 m,雨季为 12.04 m,年为 6.58 m。

3 讨论

本研究表明,区域气候变暖,会导致土壤温度升高,但是对土壤温度的日变化和季节变化特征不会产生影响;土壤表层的增温效应较显著,特别是在1—4月土壤表层的增温效应的温差高于2.4 °C,2月可达3.0 °C;5—10月稍低;5 cm的增温效应约一年中基本上在2 °C左右(2月最大,12月最小)。一般来说,土壤表层的腐殖质具有易分解的特性,如此看来,区域气候变暖,首先对土壤表层温度产生显著影响,将导致土壤表层的可分解物质加速分解,形成更多的CO₂排放,对生态系统碳平衡产生影响。通过建立土壤增温效应与土壤深度的相关公式,可以计算得到不同月份和季节气候变暖对土壤温度的影响深度,其影响具有较大的年变化,8—9月可影响到近30 m,而12月仅能影响到2.04 m。综合来看,土壤增温效应的影响深度雨季(5—10月)大于干季(11月—翌年4月),可以认为,由于干季环境温度较低,导致气候变暖对土壤温度的影响深度降低;而雨季环境温度相对较高,如果温度再升高,可对较深层的土壤产生影响,使其温度也升高。由于在生态系统中,土壤是一个巨大的碳库。本研究表明,区域气候变暖,不仅使得土壤表层的温度升高,还会导致深层土壤温度升高。一般来说,温度是影响土壤呼吸的最主要因子,区域气候变暖,不仅使浅层的土壤温度升高,还将导致深层的土壤温度也升高,这势必会增加土壤呼吸排放,改变生态系统碳平衡;最终是否会导致森林生态系统碳汇源效应发生改变,将是今后需要关注的研究内容。本研究的结果与本研究

团队利用哀牢山生态站长期观测数据得到了哀牢山亚热带常绿阔叶林的土壤温度呈现较明显的变暖趋势(You *et al.*, 2012)相一致,证实了哀牢山常绿阔叶林的土壤温度,在区域气候变暖背景下,具有相应的响应,土壤温度会出现升高的趋势;这可为其后探讨哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤呼吸对温度升高的响应研究提供良好的基础保证。

4 结 论

温度升高不会改变森林土壤温度的时空分布特征和变化规律。

森林土壤表层的增温效应较明显;在1—4月土壤表层的增温效应较显著;雨季稍低;5 cm的增温效应约一年中基本上在2℃左右(2月最大,12月最小),即使到40 cm深度,增温效应均高于1.0℃;深层土壤增温效应没有明显的日变化;土壤增温效应具有季节变化,其土壤表层变化较大,深层较小。

伴随深度的增加,森林土壤增温效应遵循对数函数呈现减小的趋势;如果设定 $\Delta T_s = 0.5^\circ\text{C}$ 为土壤增温效应影响的阈值,计算得到土壤增温效应的影响深度,呈现8—9月影响深度最大,接近30 m;而12月影响最浅,仅为2.04 m。总的来看,土壤增温效应达0.5℃的影响深度,干季(11月—翌年4月)为3.82 m,雨季(5—10月)为12.04 m,年为6.58 m。

参考文献

陈仕东, 刘小飞, 熊德成, 等. 2013. 持续性主动增温对中亚热带森林土壤呼吸影响研究初报. 亚热带资源与环境学报, **8**(4): 1–8.

冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 等. 2008. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较. 植物生态学报, **32**(1): 32–39.

韩 雄. 2008. 模拟增温对短花针茅草原生态系统气体交换影响的研究(硕士学位论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学.

刘玉洪. 1991. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤温度的分布特征. 林业科学, **27**(6): 639–643.

刘玉洪. 1992. 哀牢山山地土壤温度的垂直分布特征. 气象, **18**(12): 23–26.

刘玉洪. 1993. 哀牢山北段山地的地温气候资源分析. 自然资源学报, **8**(2): 158–165.

牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 2007. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置. 植物生态学报, **31**(2): 262–271.

潘新丽, 林 波, 刘 庆. 2008. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响. 应用生态学报, **19**(8): 1637–1643.

余 雷, 张一平, 沙丽清, 等. 2012. 哀牢山亚热带常绿阔叶林内外地温分布特征. 生态学杂志, **31**(7): 1633–

1638.

Dixon RK, Solomon AM, Brown S, *et al.* 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**: 185–190.

Feng W, Schaefer DA, Li J, *et al.* 2009a. Soil mono- and disaccharides and amino acids as influenced by plant litter and root processes in a subtropical moist forest of Southwest China. *Biogeochemistry*, **92**: 119–128.

Feng W, Zou X, Schaefer D. 2009b. Above- and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 978–983.

IPCC. 2007. The Scientific Basis Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Kauppi PE. 2003. New, low estimate for carbon stock in global forest vegetation based on inventory data. *Silva Fennica*, **37**: 451–457.

Kimball BA, Conley MM, Wang S, *et al.* 2008. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology*, **14**: 309–320.

Kimball BA. 2005. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming. *Global Change Biology*, **11**: 2041–2056.

Klein JA, Harte J, Zhao XQ. 2004. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, **7**: 1170–1179.

Lal R. 2004. Soil C sequestration impacts on global climatic change and food security. *Science*, **304**: 1623–1627.

Schaefer D, Feng W, Zou X. 2009. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 1000–1007.

Tan ZH, Zhang YP, Liang NS, *et al.* 2012. An observational study of the carbon-sink strength of East Asian subtropical evergreen forests. *Environmental Research Letters*, **7**: 044017.

Tan ZH, Zhang YP, Schaefer DA, *et al.* 2011. An old-growth Asian subtropical evergreen forest as a large carbon sink. *Atmospheric Environment*, **45**: 1548–1554.

Wan S, Hui D, Wallace L, *et al.* 2005. Direct and indirect warming effects on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**: GB2014.

Xia J, Niu S, Wan S. 2009. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe. *Global Change Biology*, **15**: 1544–1559.

You G, Zhang Y, Schaefer D, *et al.* 2012. Observed air/soil temperature trends in open land and understory of a subtropical mountain forest, SW China. *International Journal of Climatology*, **33**: 1308–1316.

作者简介 张一平,男,1957年生,博士,研究员,主要从事全球变化研究。E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

责任编辑 王 伟