

中国土壤呼吸温度敏感性空间格局的反演

周涛^{①②}, 史培军^{①②}, 惠大丰^③, 骆亦其^④

① 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

② 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

③ Department of Biological Sciences, Tennessee State University, Nashville, TN 37209, USA;

④ Department of Botany and Microbiology, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA

E-mail: tzhou@bnu.edu.cn

收稿日期: 2008-08-01; 接受日期: 2008-12-09

国家自然科学基金(批准号: 40671173, 40425008, 30590384 和 40401028)和国家重点实验室自主研究基金(批准号: 070105)资助项目

摘要 土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10} 值)是模拟全球变暖与生态系统碳释放之间反馈强度的重要参数。虽然实验研究表明 Q_{10} 值具有明显的空间异质性, 但由于其空间分布格局的定量数据的缺乏, 目前绝大多数生物地球化学模型将其简化成一个常数, 并以此来预测未来的气候变化, 这在一定程度上增大了模型预测的不确定性。本研究基于土壤有机碳的实测数据, 并结合碳循环过程模型(CASA 模型), 利用反演分析方法估算了 8 km 空间分辨率下中国土壤呼吸温度敏感性的空间分布。结果表明, Q_{10} 值具有明显的空间异质性, 且与实验方法估算的 Q_{10} 值具有一致性; 不同土壤类型的 Q_{10} 值在 1.09~2.38 之间变化, 其中火山灰土的 Q_{10} 值最大, 冷棕钙土的值最小; Q_{10} 值的空间分布与降水及土壤有机碳含量的关系密切。研究表明, 该方法能有效反演 Q_{10} 值的空间分布, 从而有助于揭示碳循环规律并降低未来大气 CO₂ 浓度及气候变化预测的不确定性。

关键词

温度敏感性

Q_{10} 值

土壤呼吸

全球变暖

反演分析

陆地生态系统的土壤呼吸在调节全球碳循环方面扮演着重要的角色, 而土壤呼吸的温度敏感性是描述全球变暖背景下土壤呼吸的变化, 以及全球变暖与土壤碳循环之间反馈强度的指标^[1,2]。土壤呼吸的温度敏感性通常用 Q_{10} 值表示, 它是指温度升高 10°C, 土壤呼吸强度增大的倍数^[3], 它是生物地球化学模型描述碳循环过程的一个重要参数^[4]。到目前为止, 绝大多数模型通常假设 Q_{10} 值在全球范围内不变(如 Q_{10} 取 2.0), 并以此来估算气候变化背景下的土壤碳释放。如果考虑到 Q_{10} 值在空间分布上的异质性, 陆地生态系统碳循环对气候变暖的响应在大小和方向上会发生显著的变化^[5]。

生态系统尺度上的 Q_{10} 值通常采用实验方法, 通

过土壤呼吸与温度的测量数据来估算^[6]。实验结果表明 Q_{10} 值的大小受土壤温度^[7]、土壤有机物的质量和数量^[8]、土壤湿度^[9]、土地覆盖类型^[10]的影响。由于温度升高所导致的底物降低, 实验方法估算的土壤 Q_{10} 值通常随温度的升高而降低^[3]。土壤湿度同样影响温度敏感性, 土壤湿度过低会影响土壤中可溶性底物的扩散能力, 而湿度过高则会影响氧气的扩散能力, 这两种情况都会限制土壤微生物的呼吸^[3]。由于土壤温度、湿度、土壤有机碳等环境因素具有明显的空间异质性, 因此, 通过实验方法估算的 Q_{10} 值亦表现出明显的空间异质性, 它们随着地理位置的不同而不同^[11]。

从方法上看, 传统的 Q_{10} 值研究主要基于回归分

析方法, 通过拟合观测的土壤呼吸与温度得到^[12]。由于回归经验模型不考虑与土壤呼吸相关的生理过程, 因而该方法估算 Q_{10} 值可能缺乏机理上的解释。过高的 Q_{10} 估算值(如 Q_{10} 值显著大于 2.5)可能是因为忽略了其他关键因素(如底物供应量)^[3]。除此以外, 土壤呼吸的观测仪器的精度也会影响 Q_{10} 值的估算, 例如静态箱式法会潜在低估土壤呼吸的 Q_{10} 值^[12]。

反演方法由于能够有效结合实验观测数据和过程模型, 因此它是估算土壤呼吸温度敏感性参数的一种潜在的方法^[13]。例如, Ise 和 Moorcroft^[14] 基于土壤有机碳分解模型, 利用土壤有机碳观测数据反演了全球的 Q_{10} 值。Zhou 与 Luo^[15] 则基于 TECO-R 模型和遥感数据, 利用反演方法估算了生态系统(植物与土壤)碳周转时间的空间分布。

本研究基于生态系统碳循环过程模型(CASA 模型)与实测的土壤有机碳数据, 来反演中国 8 km 分辨率下 Q_{10} 值的空间分布, 并对反演的 Q_{10} 值与实验观测的 Q_{10} 值进行比较; 在此基础上, 分析区域尺度上 Q_{10} 值和降水量、土壤有机碳等环境因子之间的统计关系; 最后, 基于广泛使用的土壤呼吸模型^[12]评价 Q_{10} 值空间格局对土壤呼吸模拟的潜在影响。

1 材料与方法

1.1 模型、数据及反演算法

土壤有机碳(SOC)的储量及变化取决于土壤有机碳的输入(源于生态系统的生产力)和土壤有机碳的输出(源于土壤呼吸)。土壤呼吸的大小和 Q_{10} 值、气候因子、SOC 的理化属性以及土壤的质地有关^[1]。因此, 特定站点的土壤有机碳储量受 Q_{10} 、气候因子、土壤属性以及生态系统生产力等因素控制。在土壤的长期演化过程中, 土壤有机碳逐步积累并逐步达到平衡状态, 从而使得土壤呼吸释放的碳与通过植物凋落过程进入到土壤中的碳达到平衡状态^[16]。

本研究采用碳循环过程模型(CASA 模型^[17,18]), 并结合土壤有机碳观测数据以及相应的环境数据来估算土壤呼吸的 Q_{10} 值。其中, CASA 模型中的净初级生产力(NPP)子模型用来约束土壤碳的输入, 而土壤碳子模型(含待反演的 Q_{10} 值)则用于约束土壤碳的输出。本研究假设土壤碳循环处在平衡状态, 即土壤流出的碳与流入的碳相等。因此, 给定土壤有机碳观测

值以及相应的环境因子, 通过最小化土壤有机碳观测值与模拟值的差异, 从而反演出特定格点的 Q_{10} 值。

本研究的土壤有机碳实测数据来源于第二次全国土壤普查资料, 它包括 2473 个典型土壤剖面数据^[19]。本研究采用的遥感数据(NDVI)来自 GIMMS 提供的 1982~1999 年标准的 8 km 分辨率数据(<http://glcf.umiacs.umd.edu/>)。CASA 模型中输入的气象数据包括月平均温度、降水及太阳辐射数据, 它们来自中国气象局气象数据共享系统(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。土壤和植被类型来自中国科学院地理科学与资源研究所编制的 1:400 万地图。在模型运行之前, 所有这些数据都重采样到相同的地理投影和空间分辨率。

针对每一空间格点 x , 最优 Q_{10} 值在域值 $Q \in [Q_{min}, Q_{max}]$ 中搜索, 使得:

$$|S_{m,x}(Q_{10}^0(Q)) - S_{0,x}| \leq |S_{m,x}(Q'_{10}) - S_{0,x}|, \forall Q'_{10} \in Q \quad (1)$$

其中, $S_{0,x}$ 为空间格点 x 的土壤有机碳观测值(0~30 cm), $S_{m,x}(Q_{10}^0(Q))$ 为采用最优 Q_{10} 值(Q_{10}^0)模拟的土壤有机碳。 $S_{m,x}(Q'_{10})$ 为采用任意 Q_{10} 值模拟的土壤有机碳。当所有空间格点的 Q_{10} 值取最优值时, 中国土壤有机碳的模拟值与观测值的总偏差最小。

$$J(Q) = \frac{\sum_x |S_{m,x}(Q_{10}^0(x)) - S_{0,x}| \times a(x)}{\sum_x a(x)} \quad (2)$$

其中, $a(x)$ 为格点 x 的面积, J 是模拟土壤有机碳与实测值的平均偏差, 它取决于每个格点的最优 Q_{10} 值。

确定 Q_{10} 域值的下限相对容易, 在本研究中 Q_{min} 取值为 1, 它表示土壤呼吸不随温度而变化。然而, 要确定域值的上限(Q_{max})比较困难。基于土壤呼吸实验数据和回归分析方法估算的 Q_{10} 值的上限变化很大, 有的甚至超过 10。但 Davidson 等人^[3] 认为, 这些过高的 Q_{10} 值(Q_{10} 显著高于 2.5)是不合理的, 这些非常高的 Q_{10} 值是由于回归经验模型忽略了一些复杂的过程或因素(如底物的供应)所致。正因为如此, 本研究并不事先设置 Q_{max} 的值的大小, 而是采用先验知识来对它进行约束。确定 Q_{max} 的基本原则是: 合理的 Q_{max} 值能使得在域值 $[1, Q_{max}]$ 中搜索得到的各格点的最优 Q_{10} 值的均值与基于土壤呼吸实验方法得到的均值相一致。

1.2 结果验证

为了确定 Q_{10} 值, 以及检验反演分析方法所得到的 Q_{10} 值空间分布格局是否合理, 本研究收集并整理了中国典型生态系统基于土壤呼吸实验获取了 Q_{10} 值, 并与本研究通过反演方法估算的对应空间格点中的 Q_{10} 值进行了比较. 用于验证的生态系统类型包括森林、草地、牧场与农田.

1.3 Q_{10} 空间分布对土壤呼吸模拟的影响评价

为了评价 Q_{10} 值的空间异质性对气候变暖背景下土壤呼吸模拟的影响, 本研究分别采用 Raich 等人^[12] 的土壤呼吸模型(模型A: 各空间格点的 Q_{10} 值相等)与改进后的模型(模型B: 采用反演的 Q_{10} 值空间格局)模拟了温度升高情景下的土壤呼吸增量. 在模拟时, 假定中国各空间格点月平均温度均匀升高 1 °C.

模型 A:

$$R_s = f \times e^{(b \times T_a)} \times [P / (k + P)] \quad (3)$$

其中, R_s 为月平均土壤呼吸量($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); 其中参数 b 为温度敏感性系数($b = \ln Q_{10} / 10$, $Q_{10} = 1.72$); T_a 为月平均温度(°C); P 为月降水量(cm); f 和 k 为常数

($f = 1.250$, $k = 4.259$).

模型 B:

$$R'_s = f \times e^{(b_x \times T_a)} \times [P / (k + P)] \quad (4)$$

其中, b_x 为空间格点 x 的温度敏感性系数($b_x = \ln Q_{10} / 10$, $x / 10$, $Q_{10}(x)$ 为空间格点 x 的 Q_{10} 值); R'_s 为月平均土壤呼吸量($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 Q_{10} 值的空间分布格局

反演结果表明, Q_{10} 值具有明显的空间异质性(图 1). 中国东部地区的 Q_{10} 值明显高于西部地区, 这与东部地区受典型季风气候影响, 其环境较温暖湿润, 因而具有较高的生产力^[20]和土壤有机碳含量^[21]有关. 另一方面, 良好的环境条件反过来可以缓解限制性因素对土壤呼吸的影响, 从而使土壤呼吸具有较高的温度敏感性^[3].

不同土壤类型的 Q_{10} 均值具有较大的变化, 其值在 1.09~2.38 之间变化. 其中火山灰土的 Q_{10} 均值最大, 而冷棕钙土的 Q_{10} 均值最小(表 1). 从植被类型看, 森林土壤的 Q_{10} 均值最大, 标准差相对较小(2.11 ± 0.43);

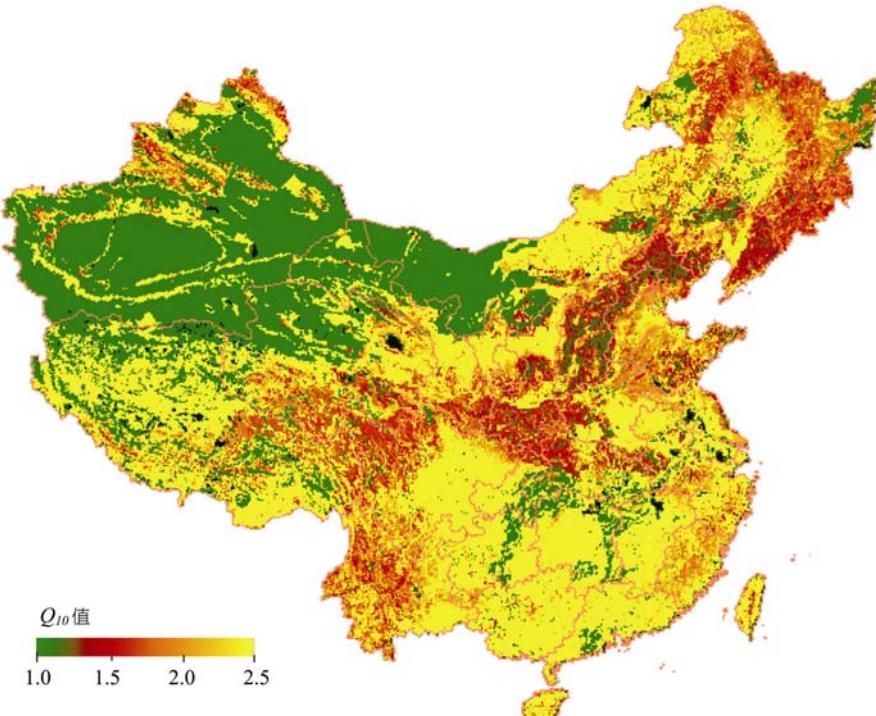


图 1 土壤呼吸温度敏感性(Q_{10} 值)的空间分布格局

草地土壤的 Q_{10} 均值较低, 具有相对较高的标准差 (2.01 ± 0.61); 农田土壤的 Q_{10} 均值介于森林与草地土壤之间 (2.08 ± 0.45), 这和农田土壤的中等生产力及土壤湿度条件一致. 对于整个中国而言, 全国平均的 Q_{10} 值为 1.80.

表 1 不同土壤类型的 Q_{10} 均值

土壤类型	Q_{10} 值	土壤类型	Q_{10} 值
砖红壤	1.78	石灰土	2.08
赤红壤	2.21	火山灰土	2.38
红壤	1.87	紫色土	1.88
黄壤	2.10	粗骨土	1.29
黄棕壤	1.65	石质土	1.26
黄褐土	1.77	草甸土	1.85
棕壤	1.54	潮土	1.70
黑棕壤	1.61	砂姜黑土	2.21
白浆土	1.37	林灌草甸土	1.85
棕色针叶林土	2.04	山地草甸土	2.23
燥红壤	1.47	沼泽土	1.85
褐土	1.63	盐土	1.72
灰褐土	2.11	滨海盐土	1.77
黑土	1.86	漠境盐土	1.45
灰色森林土	1.57	寒原盐土	2.01
黑钙土	2.05	碱土	1.68
栗土	2.12	水稻土	2.17
栗褐土	1.68	灌淤土	1.78
黑垆土	2.23	灌漠土	1.91
棕钙土	1.65	草毡土	1.90
灰钙土	2.14	黑毡土	1.89
灰漠土	1.09	寒钙土	1.92
灰棕漠土	1.13	冷钙土	1.63
棕漠土	1.11	冷棕钙土	1.03
黄绵土	1.75	高山寒漠土	1.10
红黏土	1.72	冷漠土	1.67
新积土	2.01	高山寒土	1.36
龟裂土	1.31	其他	1.27
风沙土	1.19		

对于任意空间格点而言, 其反演的最优 Q_{10} 值与搜索域值 Q 的大小有关. 当域值的上限 (Q_{max}) 取 2.5 时, 反演得到的 Q_{10} 值与基于土壤呼吸实验观测到的 Q_{10} 最为接近. 这与Davidson等人^[3]的研究结果一致, 他

们认为 Q_{10} 值显著高于 2.5 是不正常的, 高值的出现很可能是回归模型忽略了一些与特定站点有关的底物供应过程所致.

2.2 结果验证

在不同的生态系统中, 反演的 Q_{10} 值与对应空间格点的基于土壤呼吸实验得到的 Q_{10} 观测值具有较好的相关性(图 2), 图中的 Q_{10} 观测值来源于正式发表的文献资料, 它们通过拟合实验观测的土壤呼吸与温度数据得到(表 2). 基于土壤有机碳和过程模型反演的 Q_{10} 值虽然在方法上与基于土壤呼吸实测数据得到的观测值不同, 但它们之间的 Q_{10} 值具有显著的相关性($r = 0.70$).

同时, 由于方法及数据源方面的差异, 本研究反演的 Q_{10} 值与基于土壤呼吸实验得到的 Q_{10} 观测值相比, 也表现出一些不同的特征. 土壤有机碳起源于生态系统的净初级生产力, 它们通过植物的凋落过程进入土壤并在土壤中缓慢积累达到近似平衡状态^[16], 因此通过土壤有机碳观测数据反演的 Q_{10} 值代表的是多年平均的温度敏感性, 这在某种程度上不同于通过实验观测得到瞬时值. 另外, 从方法上看, 通过土壤有机碳和CASA模型反演的是土壤异养呼吸的温度敏感性, 它不包含植物根的自养呼吸. 因此, 本研究反演得到 Q_{10} 值的空间分布格局在大尺度上更适合预测长期的气候变暖与土壤有机碳释放之间的反馈关系.

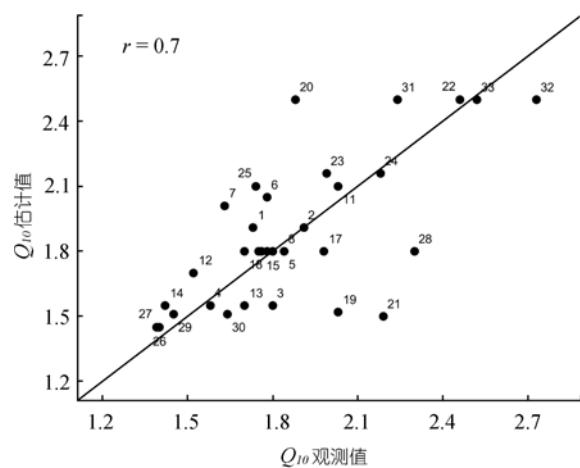


图 2 Q_{10} 反演值与观测值的对比

图中的数字为观测站点编号, 其信息如表 2 所示

表 2 Q_{10} 反演值与观测值的对比

编号	经度	纬度	生态系统类型	观测 Q_{10}	反演 Q_{10}	参考文献
1	115.05	26.73	亚热带马尾松人工林	1.73	1.91	[22]
2	115.05	26.73	亚热带马尾松人工林	1.91	1.91	[22]
3	128.08	42.40	温带针阔混交林	1.80	1.55	[22]
4	128.08	42.40	温带针阔混交林	1.58	1.55	[22]
5	116.82	43.51	农田	1.84	1.80	[23]
6	116.57	43.80	农田	1.78	2.05	[23]
7	116.31	43.91	农田	1.63	2.01	[23]
8	116.82	43.51	草地	1.84	1.80	[24]
9	116.69	43.63	草地	1.75	1.80	[24]
10	116.57	43.80	草地	1.78	1.80	[24]
11	112.55	23.17	混交林	2.03	2.10	[25]
12	110.75	39.60	草地	1.52	1.70	[26]
13	116.50	39.67	辽东栎林	1.70	1.55	[27]
14	116.50	39.67	辽东栎林	1.42	1.55	[27]
15	120.70	42.92	退化草地	1.80	1.80	[28]
16	115.53	43.43	草地	1.76	1.80	[29]
17	115.53	43.43	草地	1.98	1.80	[29]
18	115.53	43.43	草地	1.70	1.80	[29]
19	101.27	21.93	热带季雨林	2.03	1.52	[30]
20	112.54	23.17	混交林	1.88	2.50	[31]
21	128.47	42.40	针叶林	2.19	1.50	[32]
22	123.75	44.75	草甸草原	2.46	2.50	[33]
23	105.45	31.27	草地	1.99	2.16	[34]
24	105.45	31.27	草地	2.18	2.16	[34]
25	123.37	41.52	农田	1.74	2.10	[35]
26	118.25	26.55	中亚热带人工林	1.40	1.45	[36]
27	118.25	26.55	中亚热带人工林	1.39	1.45	[36]
28	91.08	30.85	高山草甸	2.30	1.80	[37]
29	133.52	47.58	农田	1.45	1.51	[38]
30	133.52	47.58	农田	1.64	1.51	[38]
31	112.53	23.18	常绿阔叶林	2.24	2.50	[39]
32	112.53	23.18	常绿阔叶林	2.73	2.50	[39]
33	112.53	23.18	混交林	2.52	2.50	[40]

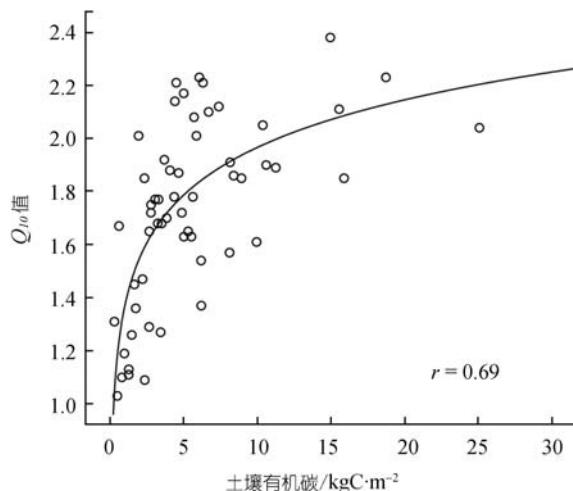
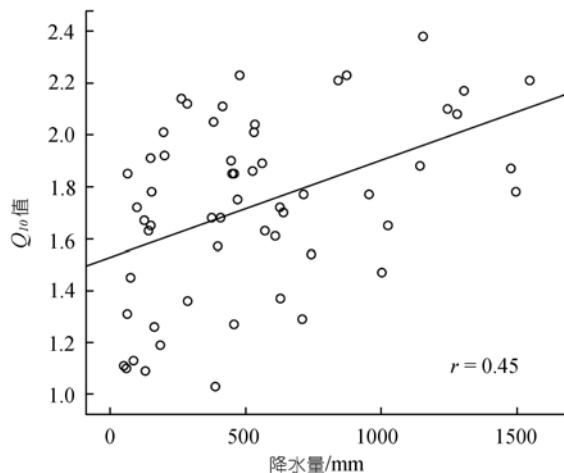
2.3 Q_{10} 与环境因子的统计关系

反演的 Q_{10} 值与环境因子的统计分析表明, Q_{10} 与土壤有机碳含量及降水量之间存在显著的统计关系(图 3 和 4). 其中 Q_{10} 值与 $\ln(\text{SOC})$ 的相关系数达到 0.69, 这与 Taylor^[41] 以及张金波^[38] 等人的研究类似, 它们的研究表明 Q_{10} 值与土壤有机碳含量具有正的相

关性. 反演的 Q_{10} 值与降水同样具有显著的正相关性 ($r = 0.45$), 这主要是由于降水增多导致的土壤湿度增大, 这有助于土壤水溶性底物的扩散^[3], 从而导致 Q_{10} 与土壤湿度之间表现出正的相关性^[42].

2.4 土壤呼吸对增温的反馈

在相同的增温情景下(各空间格点月平均温度均

图 3 Q_{10} 值与土壤有机碳(SOC)之间的统计关系图 4 Q_{10} 值与降水量之间的统计关系

匀升高 1°C, 模型 A(公式 3)与模型 B(公式 4)模拟的土壤呼吸的增量无论是在总量上还是在空间分布上均存在明显的差异(图 5). 虽然从大的空间分布格局上看, 增温所导致的土壤呼吸的相对增强量在空间上具有一致性, 但和模型 A 相比, 模型 B 由于包含了土壤呼吸温度敏感性的空间异质性. 因此, 它揭示了更多与特定空间格点有关的信息, 如土壤有机碳含量、植被类型、生态系统生产力等与 Q_{10} 值有关的信息.

统计结果表明, 如果忽略温度敏感性 Q_{10} 值的空间差异时(模型 A), 温度升高 1°C 所导致的土壤呼吸增强量为 $23.04 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 而如果考虑 Q_{10} 值的空间

差异(模型 B), 温度升高 1°C 所导致的土壤呼吸增强量为 $34.84 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$. 这意味着当 Q_{10} 简化为常数时, 土壤呼吸模型将潜在低估气候变暖与土壤碳释放的反馈强度(约 33.8%). 该值与 Jones 等人^[5]的研究结果接近, Jones 等人利用厄尔尼诺——南方涛动与火山爆发信息估算了 Q_{10} 值的不确定性, 并进而推断出其不确定性所导致的土壤呼吸反馈强度变化幅度约为 25%.

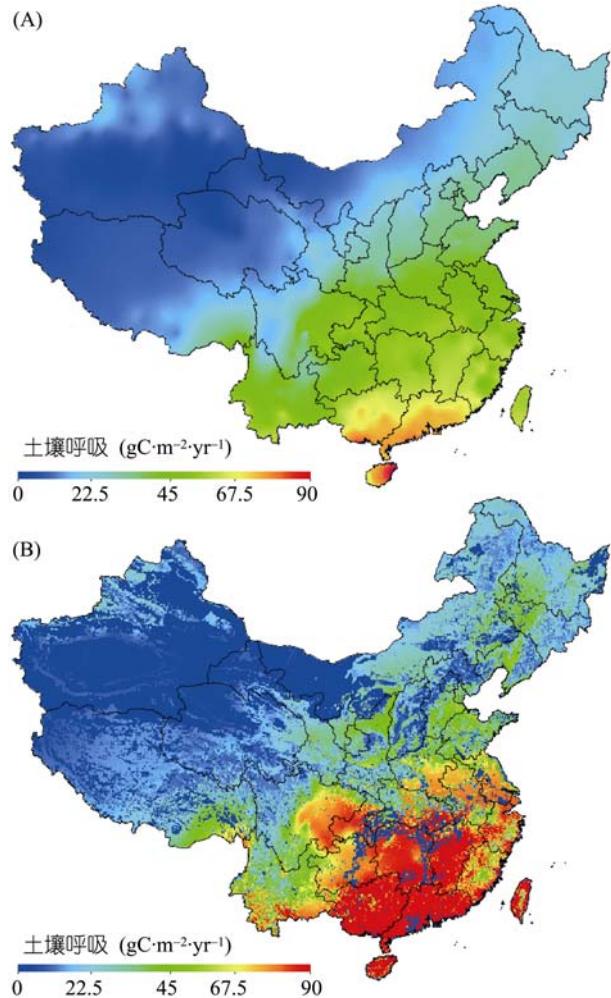


图 5 当温度均匀升高 1°C 时土壤呼吸增强的模拟值

(A) 模型 A; (B) 模型 B

3 结论

土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10} 值)以及其空间分布格局对准确预测未来气候变化与大气 CO_2 浓度至关重要. 本研究利用反演方法, 基于土壤有机碳观测数

据和碳循环过程模型, 反演了中国 8 km 分辨率下的 Q_{10} 值的空间分布。结果表明, Q_{10} 值具有明显的空间异质性, 其反演结果与基于土壤呼吸实验获得的观测结果具有较好的一致性。统计分析表明, Q_{10} 与降

水之间具有正相关($r=0.45$), 与 $\ln(\text{SOC})$ 亦具有正相关性($r=0.69$)。在全球变暖背景下, 包含 Q_{10} 值空间分布格局的土壤呼吸模型可以潜在降低其预测的不确定性。

致谢 感谢斯坦福大学全球生态学系 Chris Field 教授提供的 CASA 模型源代码、中国科学院地理科学与资源研究所王绍强博士提供的土壤有机碳观测数据、中国气象数据共享网提供的气象数据和 GIMMS 提供的 NDVI 数据集。

参考文献

- 1 Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Glob Biogeochem Cycle*, 1994, 8(3): 279—293 [[DOI](#)]
- 2 Luo Y. Terrestrial carbon cycle feedback to climate warming. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2007, 38: 683—712 [[DOI](#)]
- 3 Davidson E A, Janssens I A, Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} . *Glob Change Biol*, 2006, 12: 154—164 [[DOI](#)]
- 4 Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249—252 [[DOI](#)]
- 5 Jones C D, Cox P, Huntingford C. Uncertainty in climate-carbon-cycle projections associated with the sensitivity of soil respiration to temperature. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 2003, 55: 642—648 [[DOI](#)]
- 6 Luo Y, Zhou X. *Soil Respiration and the Environment*. San Diego: Academic Press, 2006. 1—320
- 7 Luo Y, Wan S, Hui D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622—625 [[DOI](#)]
- 8 Wan S Q, Luo Y Q. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: Results of a clipping and shading experiment. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17(2): 1054 [[DOI](#)]
- 9 Hui D, Luo Y. Evaluation of soil CO_2 production and transport in Duke Forest using a process-based modeling approach. *Glob Biogeochem Cycle*, 2004, 18: GB4029, doi: 10.1029/2004GB002297
- 10 Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71—90 [[DOI](#)]
- 11 Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevadan forest. *Glob Biogeochem Cycle*, 2001, 15(3): 687—696 [[DOI](#)]
- 12 Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-1994. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 800—812 [[DOI](#)]
- 13 Raupach M R, Rayner P J, Barrett D J, et al. Model-data synthesis in terrestrial carbon observation: methods, data requirements and data uncertainty specification. *Glob Change Biol*, 2005, 11, 378—397 [[DOI](#)]
- 14 Ise T, Moorcroft P R. The global-scale temperature and moisture dependencies of soil organic carbon decomposition: an analysis using a mechanistic decomposition model. *Biogeochemistry*, 2006, 80: 217—231 [[DOI](#)]
- 15 Zhou T, Luo Y. Spatial patterns of ecosystem carbon residence time and NPP-driven carbon uptake in the conterminous United States. *Glob Biogeochem Cycle*, 2008, 22, GB3032, doi:10.1029/2007GB002939 [[DOI](#)]
- 16 Cannell M G. R, Thornley J H M. Ecosystem productivity is independent of some soil properties at equilibrium. *Plant Soil*, 2003, 257: 193—204 [[DOI](#)]
- 17 Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Glob Biogeochem Cycle*, 1993, 7(4): 811—841 [[DOI](#)]
- 18 Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1995, 51: 74—88 [[DOI](#)]
- 19 Wang S, Tian H, Liu J, et al. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s-1980s. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 2003, 55: 642—648 [[DOI](#)]

- orol, 2003, 55: 416—127 [[DOI](#)]
- 20 Sun R, Zhu Q. Estimation of net primary productivity in China using remote sensing data. *J Geogr Sci*, 2001, 11(1): 14—23 [[DOI](#)]
- 21 周涛, 史培军, 罗巾英, 等. 基于遥感与过程模型估算土壤有机碳储量. *遥感学报*, 2007, 11(1): 127—136
- 22 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(2): 84—94
- 23 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与水分的关系. *生态学报*, 2004, 24(4): 831—836
- 24 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对温度变化的响应. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 441—447
- 25 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 976—986
- 26 郭婷. 皇甫川五分地沟小流域不同土地利用方式下土壤呼吸特征的研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2006
- 27 蒋高明, 黄银晓. 北京山区辽东栎林土壤释放 CO₂ 的模拟实验研究. *生态学报*, 1997, 17(5): 477—482
- 28 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 等. 土壤温度和水分对不同类型沙区土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 154—158
- 29 刘立新, 董云社, 齐玉春, 等. 内蒙古锡林河流域土壤呼吸的温度敏感性. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 226—230
- 30 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(2): 167—174
- 31 王春林, 周国逸, 唐旭利, 等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27(7): 2659—2668
- 32 王焱, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 土壤呼吸和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1234—1238
- 33 王妮, 郭继勋. 松嫩草甸草地碱茅群落根呼吸对土壤呼吸的贡献. *科学通报*, 2006, 51(5): 559—564
- 34 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960—1968
- 35 王重阳, 王绍斌, 顾江新, 等. 下辽河平原玉米田土壤呼吸初步研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1240—1244
- 36 尉海东, 马祥庆. 中亚热带 3 种主要人工林的土壤呼吸动态. *福建农林大学学报*, 35(3): 272—277
- 37 张东秋, 石培礼, 何永涛, 等. 西藏高原草原化小嵩草草甸生长季节土壤微生物呼吸测定. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 458—364
- 38 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析. *环境科学学报*, 2005, 25 (11): 1537—1542
- 39 周存宇, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(2): 175—182
- 40 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23—27
- 41 Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 1989, 70: 97—104 [[DOI](#)]
- 42 Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiol*, 2003, 23: 1263—1270