黑河中游不同土地覆被类型土壤呼吸及对水热因子的响应

牛瑞雪[1]，刘继亮[2]，胡彦萍[3]，付 英[1]

(1. 甘肃省科学技术情报研究所，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所，甘肃 兰州 730000；3. 兰州石化职业技术学院，甘肃 兰州 730060)

摘要：以黑河中游 6 种典型土地覆被类型(百年灌溉农田、新垦灌溉农田、人工杨树林、人工樟子松林、人工梭梭灌木林和天然荒漠草地)为研究对象，对土壤呼吸及其对土壤含水量和土壤温度的响应进行测定。结果表明：灌溉农田的土壤呼吸速率显著大于人工樟子松林地和杨树林地，人工林地显著大于荒漠草地和梭梭灌木林地。6 种土地覆被类型土壤呼吸速率与土壤温度显著正相关性，Q_{10} 值 1.14～1.31，表明该地区土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性低于世界平均水平；土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著的指数关系。这表明 6 种土地覆被类型的土壤呼吸特征存在显著差异，且不同土地覆被类型的土壤呼吸特征与水热因子关系密切，以人类活动为主导的土地覆被变化深刻影响着荒漠绿洲生态系统水土气生的相互作用。

关键词：黑河中游；土地覆被；土壤呼吸；水热因子

文章编号：1000-694X(2017)05-0961-09 **DOI**：10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00148

中图分类号：S15 **文献标志码**：A

0 引言

黑河流域是中国第二大内陆河流域，20 世纪 70 年代以来，因全球气候变化及水土资源开发利用等人类活动影响的加剧，绿洲土地利用方式出现变化，呈现多样化的土地利用/覆被景观类型[1-2]。不同的土地利用/覆被类型不仅能够改变地表生态水文过程，而且对土壤生态过程产生显著影响[3-4]。绿洲是干旱区生态系统结构和功能的重要组成部分，尤其是通过人工灌溉发展起来的新型绿洲，已成为干旱区人类赖以生存和繁衍的重要基地[5-6]。土壤呼吸速率是综合反映植被根系呼吸、土壤微生物呼吸以及土壤动物活性状况的重要指标，它不仅表征着土壤物理、化学和生物特性，更重要的是还反映着土壤中碳素的周转速率[7-10]。因此，研究土壤呼吸不仅对于了解土壤生物学特性具有重要意义，而且对准确评估陆地生态系统碳收支、碳失汇及气候变化影响等方面问题都具有重要参考意义[7, 11-12]。随着全球气候变化对人类生活影响的日益加剧，CO_2 等温室气体的排放和吸收等问题正得到国际上越来越广泛的关注，推动了有关不同生态系统土壤呼吸方面的研究。因此，对人类活动造成的不同土地覆被变化下土壤水文环境及土壤碳排放的掌握，及土壤水文环境与土壤呼吸特征之间关系的研究对陆地生态系统固碳减排和脆弱生态系统的保护和恢复具有重要意义[13-16]。本文以黑河中游临泽县人工绿洲区几种具有代表性的土地覆被类型(天然荒漠草地、百年灌溉农田、新垦灌溉农田以及不同的人工防风固沙植被如人工杨树林、人工樟子松林、人工梭梭灌木林)为研究对象，测定土壤呼吸速率和水热因子，并对土壤呼吸速率和水热因子关系进行剖析，为不同土地利用/覆被变化下土壤呼吸特征和碳循环发展提供理论依据，为进一步揭示区域生态环境演变提供参考。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市临泽县，属于黑河中游绿洲区的人工绿洲，距兰州市 600 km，距张掖市 80 km，距临泽县城 25 km(图 1)。地理位置 38°57′—39°42′N、99°51′—100°30′E，东西长 49.7 km，

收稿日期：2016-09-19；**改回日期**：2016-11-24

资助项目：国家自然科学基金项目(71363003，41201248，41471210)；中国科学院西部之光博士项目(Y529881001)

作者简介：牛瑞雪(1984—)，女，陕西延安人，博士，副研究员，主要从事植物生态学和区域科技发展战略研究。E-mail：niuruixue815@163.com

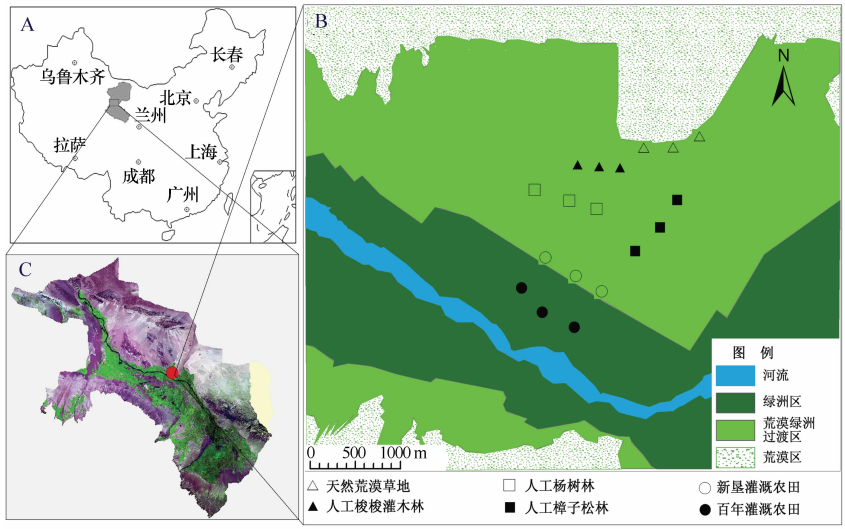


图 1 研究区位置及样地示意图

Fig. 1 Map showing the location of sampling sites in the middle reaches of the Heihe River Basin

南北宽 77 km，总面积约2 774 km^2。属温带大陆性干旱荒漠气候，年平均降水量 117 mm，年平均蒸发量2 390 mm，是降水量的 20 倍。年平均气温 7.6 ℃，地带性土壤为灰棕漠土。绿洲区的主要土壤类型为绿洲潮土和灌漠土，绿洲边缘主要是风沙土[6]。

2 研究方法

2.1 样地的选择

临泽人工绿洲是张掖绿洲的重要组成部分。20 世纪 70 年代以来，随着人类活动的加剧，例如对当地水土资源的开发利用和生态保护工程等活动的开展建设，区域绿洲已变成多样化的土地覆被类型。如，由原来的天然荒漠草地转化而成的土地覆被类型主要有绿洲灌溉农田、人工梭梭灌木林、人工柽柳灌木林、人工杨树林、人工樟子松林等。我们选择当地具有代表性的土地覆被类型，土地利用方式相同但开垦时间不同的百年灌溉农田和开垦 26～28 a 的灌溉农田（简称新垦灌溉农田）；在绿洲边缘区域选择营造时间相近的不同人工防风固沙林（包括 20～22 a 的人工梭梭灌木林、28 a 的人工杨树林和 33 a 的人工樟子松林）作为实验对象，并以绿洲边缘区域的天然荒漠草地（代表无人类活动扰动）作为对照。6 种土地覆被类型样地的概况见表 1。

表 1 6 种土地覆被类型样地的概况

Table 1 General situations of the six land cover types

	百年灌溉农田	新垦灌溉农田	人工樟子松林	人工杨树林	人工梭梭灌木林	天然荒漠草地
开垦时间/a	＞100	26～28	33	28	20～22	
土地利用方式	灌溉农田	灌溉农田	防风固沙林	防风固沙林	防风固沙林	
种源地			辽宁章古台	本地种	本地种	自然繁育
主要植物	玉米/小麦	玉米/小麦	樟子松	二白杨	梭梭	泡泡刺、沙拐枣
灌溉水平	年灌溉 6～7 次，总灌溉量为15 000～18 000 m^3 · hm^{-2}	年灌溉 7～8 次，总灌溉量为16 000～19 000 m^3 · hm^{-2}	年灌溉 2～3 次，总灌溉量为1 200～15 000 m^3 · hm^{-2}	无	无	无
化肥施用量	年施氮磷钾和复合肥1 200～1 500 kg · hm^{-2}	年施氮磷钾和复合肥1 650～1 950 kg · hm^{-2}	无	无	无	无
有机肥施用量	2～3 年施一次，年施用量18 000～24 000 kg · hm^{-2}	2～3 年施一次，年施用量18 000～24 000 kg · hm^{-2}	无	无	无	无
人为扰动情况	收获后翻耕，春播前耙平	收获后翻耕，春播前耙平	2009 年起禁牧	2009 年起禁牧	2009 年起禁牧	2009 年起禁牧

2.2　试验设计与取样方法

在 6 种土地覆被类型中选择典型样点，于 2014 年在植物生长的旺季(8 月)选取晴朗无风日，分别对不同类型样地的土壤呼吸进行循环监测，每个样地连续监测 3 d。选择土壤表面均匀一致的位置，利用 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统与其配置的 103 气室(8100-103)进行土壤呼吸测量。在每次测定前 1 d 将 8100-103 土壤环嵌入到土壤中，使其上沿高出样地地面 2～3 cm。待 24 h 平衡后，土壤呼吸速率会恢复到土壤环放置前的水平，此时开始对土壤呼吸速率进行连续测定[17-18]。观测时间为 24 h 连续测定，测定间隔时间为 1 h，测量时间为 2 min，每一监测点重复测定 3 次，分析采用平均值。用 LI-8100 地温监测端口同步测定地下 10 cm 的地温，表层(0～20 cm)土壤含水量用烘干(105 ℃)称重法测得。土壤呼吸速率(SR，$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)计算公式为：

$$SR = \frac{V_c \times P \times \frac{\partial C_s}{\partial t}}{S_c \times (T - 373.15) \times R}$$

式中：V_c为 103 气室的体积(4.82×10^{-3} m^3)；S_c为 103 气室底的面积(0.03 m^2)；P 为大气压(kPa)；T 为空气温度(℃)；R 为气体常数；$\partial C_s/\partial t$ 为进行土壤呼吸测定过程中利用 103 气室测定的 CO_2变化速率($\mu mol \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$)。

2.3　数据分析

使用 SPSS13.0 统计软件进行数据分析，用 Excel 绘图。

3　结果与分析

3.1　不同土地覆被类型植被盖度和土壤基本特征

植被盖度最大的是新垦灌溉农田，其次是百年灌溉农田、人工梭梭灌木林、人工樟子松林和人工杨树林，天然荒漠草地的盖度最小(表 2)。天然荒漠草地和人工梭梭灌木林地日均土壤温度最高，且显著高于其他 4 种土地覆被类型；两种灌溉农田的土壤含水量最高，且均显著高于其他 4 种土地覆被类型，经过灌溉的人工杨树林和人工樟子松林的土壤含水量也显著高于人工梭梭灌木林和天然荒漠草地；田间持水量人工杨树林和人工樟子松林最高，且显著高于其他 4 种土地覆被类型，百年灌溉农田的田间持水量又显著高于新垦灌溉农田、人工梭梭灌木林和天然荒漠草地。天然荒漠草地土壤容重最高，其次是人工梭梭灌木林、百年灌溉农田和新垦灌溉农田，人工杨树林和人工樟子松林地的土壤容重最低。百年灌溉农田的土壤黏粉粒含量最高，且显著高于其他土地覆被类型，此外，新垦灌溉农田、人工樟子松林和人工杨树林的土壤黏粉粒含量又显著高于人工梭梭灌木林和天然荒漠草地。

表 2　6 种土地覆被类型植被盖度及土壤基本理化性质

Table 2　The vegetation coverage and the basic physical and chemical properties of soil over the six land cover types

	百年灌溉农田	新垦灌溉农田	人工樟子松林	人工杨树林	人工梭梭灌木林	天然荒漠草地	F
植被盖度/%	83.62±0.3^b	90.74±0.5^a	78.56±0.1^b	66.69±0.3^b	82.56±0.4^b	39.11±0.5^c	90.65***
日均土壤温度/℃	22.5±0.5^b	23.6±0.7^b	23.4±0.1^b	24.0±0.3^b	34.3±0.8^a	37.5±0.5^a	130.51***
土壤含水量/%	12.6±0.3^a	11.8±0.3^a	5.6±0.3^b	5.3±0.5^b	2.9±0.1^c	2.2±0.02^c	178.8***
田间持水量/%	19.6±0.3^b	17.7±0.1^{cd}	21.6±0.5^a	21.0±0.3^a	18.5±0.2^{bc}	16.7±0.3^d	44.46***
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.54±0.01^a	1.53±0.02^a	1.41±0.02^b	1.31±0.01^c	1.55±0.01^a	1.58±0.01^a	58.6***
0.25～2 mm 粗砂粒含量/%	9.2±0.1^c	22.4±2.5^a	10.8±0.7^c	10.0±1.1^c	24.1±1.4^a	15.7±1.7^b	22.64***
0.05～0.25 mm 细砂粒含量/%	79.2±0.3^{ab}	73.9±2.6^b	84.5±0.3^a	83.3±0.4^a	74.8±1.4^b	83.8±1.7^a	11.5***
<0.05 mm 黏粉粒含量/%	11.6±0.3^a	3.7±0.4^c	4.7±0.4^{bc}	6.8±0.9^b	1.1±0.1^d	0.6±0.1^d	87.9***

不同字母表示不同样地间存在显著性差异($P<0.05$)，*** 表示在 0.001 水平上差异显著。

3.2　不同土地覆被类型的土壤呼吸速率

从图 2 可以看出，6 种土地覆被类型土壤呼吸速率日变化均呈现一定的波动趋势，且存在着明显的昼夜变化，不同土地覆被类型土壤呼吸速率峰值出现的时段也不同。天然荒漠草地、人工梭梭灌木林、人工杨树林、人工樟子松林、新垦灌溉农田、百年灌溉农田土壤呼吸速率日平均值分别为 0.47、0.60、1.41、1.73、4.17、6.80 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，最大的是百年灌溉农田，其次是新垦灌溉农田、再次是人工樟子松林、人工杨树林、人工梭梭灌木林，最小

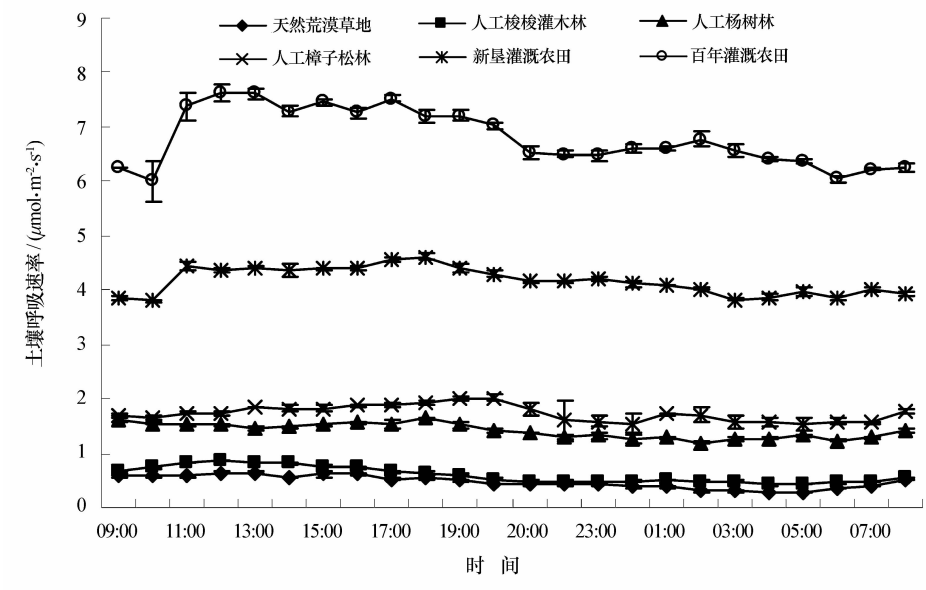


图 2 不同土地覆被类型土壤呼吸速率日变化

Fig. 2 Daily change of soil respiration over the six land cover types

的是天然荒漠草地。除人工梭梭灌木林和天然荒漠草地外，不同土地覆被类型土壤呼吸速率日平均值之间均存在显著差异。土壤呼吸速率日变化波动趋势最大的是百年灌溉农田，10:00土壤呼吸速率最低，之后迅速升高，在12:00—13:00土壤呼吸速率达到了最大，出现峰值，并一直维持较高的水平到20:00，之后出现显著的下降，直到第二天10:00降到最低水平。新垦灌溉农田土壤呼吸速率波动较平缓，基本为 4.0 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，且最低值也出现在上午10:00，最大值在18:00左右。人工樟子松林土壤呼吸速率也相对平稳，最高峰出现在20:00，之后出现一定的下降趋势，在05:00达到最小。人工杨树林土壤呼吸速率也较平缓，最大值出现在18:00，02:00土壤呼吸速率达到最小。天然荒漠草地和人工梭梭灌木林土壤呼吸速率最小，变化趋势不显著，但是相比之下夜晚的呼吸速率显著低于白天。总体来讲，6 种土地覆被类型的土壤呼吸速率表现为灌溉农田显著大于林地，林地显著大于荒漠草地和梭梭灌木林，且所有类型均为白天显著高于夜晚，且白天最大值均出现在土壤温度升高后的11:00—20:00。

3.3 不同土地覆被类型土壤呼吸速率对土壤温度的响应

由图 3 可以看出，6 种土地覆被类型土壤呼吸速率与土壤温度日变化均存在着较高的一致性。Pearson 相关分析表明，6 种土地覆被类型下土壤日呼吸速率均与土壤温度呈极显著的相关($P<0.0001$)。

土壤呼吸速率与土壤温度关系拟合的常用模型有两种，一种是线性模型，另一种是指数模型。哪种模型更为优越，目前尚未有定论[19-21]。采用线性和指数模型分别对 6 种土地覆被类型的土壤呼吸速率与土壤温度间关系进行拟合，用 R^2 作为拟合模型的变异解释量，结果如表 3 所示。线性和指数模型均能较好地描述出土壤呼吸速率与土壤温度的关系，不同土地覆被类型有的用线性模型更好，有的用指数模型更好。

温度敏感系数 Q_{10} 值是用来衡量土壤呼吸速率对土壤温度敏感性的指数，指土壤温度每升高 10 ℃，土壤呼吸速率增加的倍数。Q_{10} 值越高表明土壤呼吸速率对温度的依赖性就越大[20-22]。从表 3 可见，由指数模型计算的 6 种土地覆被类型 Q_{10} 值范围 1.14～1.31，低于世界平均水平(2.4)，变异系数为 5.43%，说明黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性远低于其他地区，且不同土地覆被类型下 Q_{10} 值的差异性很小。6 种土地覆被类型 Q_{10} 值依次为：人工梭梭林(1.31)、天然荒漠草地(1.27)、新垦灌溉农田(1.21)、百年灌溉农田(1.17)、人工杨树林(1.17)、人工樟子松林(1.14)。

3.4 不同土地覆被类型土壤呼吸速率对土壤含水量的响应

不同土地覆被类型的日均土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著的正相关性($R^2=0.9531$，$P=0.0031$)，即在一定范围内，不同土地覆被类型下表层土壤含

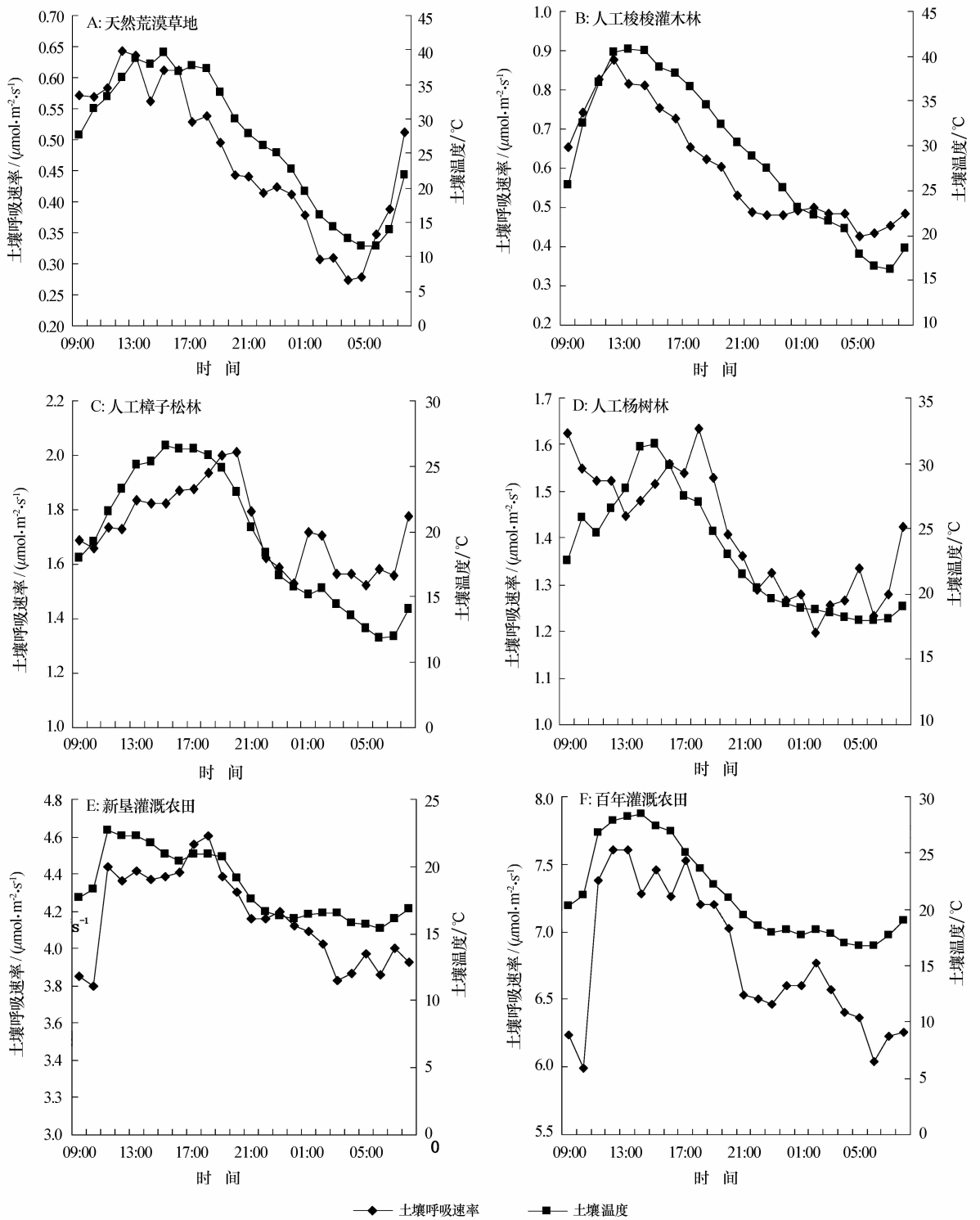


图 3　不同土地覆被类型土壤呼吸速率与土壤温度日变化比较

Fig. 3　Comparison of daily change of soil respiration and soil temperature over the six land cover types

水量越高，土壤呼吸速率越大(图 4)，说明本研究中表层土壤含水量也是影响土壤呼吸速率变化的一个重要因子。

4　讨论

土壤呼吸作用是一个复杂的生物学过程，受自然环境和人为干扰等多种因素的共同影响。土壤呼吸一方面具有某种规律性，另一方面又表现出不规则变化，显示了相当的复杂性[11−12,21−24]。影响土壤呼吸的主要因素有以下几个方面。

首先，土壤温度是影响土壤呼吸的关键因素，尤其是对土壤呼吸的日变化影响较大，二者的相关性

表 3 不同土地覆被类型土壤呼吸速率与土壤温度拟合方程和 Q_{10} 值

Table 3 Q_{10} and equation fitting correlation between soil respiration and soil temperature over the six land cover types

土地覆被类型	回归方程	Q_{10}	F	R^2
天然荒漠草地	$y=0.0109x+0.1767$		97.7133	0.8162
	$y=0.2422e^{0.0238x}$	1.27	92.1338	0.8072
人工梭梭林	$y=0.0155x+0.1536$		91.9979	0.0870
	$y=0.2712e^{0.0268x}$	1.31	110.3774	0.8338
人工杨树林	$y=0.0234x+0.8731$		36.67	0.6250
	$y=0.9774e^{0.0159x}$	1.17	34.0751	0.6077
人工樟子松林	$y=0.0234x+1.2751$		46.3111	0.6779
	$y=1.3266e^{0.0135x}$	1.14	46.4995	0.6788
新垦灌溉农田	$y=0.0811x+2.6702$		43.4762	0.6640
	$y=2.917e^{0.0193x}$	1.21	43.3027	0.6631
百年灌溉农田	$y=0.1077x+4.4894$		63.136	0.7416
	$y=4.8584e^{0.0156x}$	1.17	63.1517	0.7416

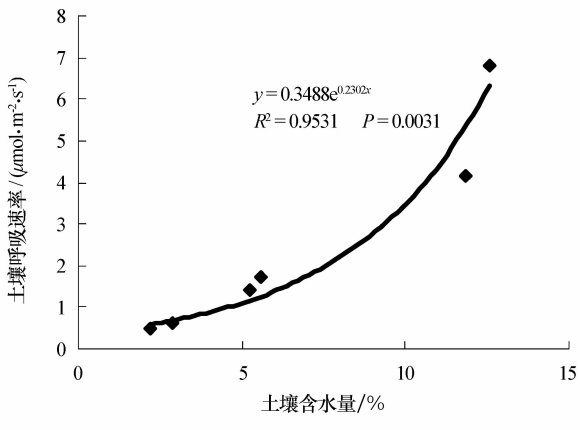


图 4 不同土地覆被类型土壤含水量与土壤呼吸速率日平均值相关性

Fig. 4 Correlation of daily average values of soil respiration and soil moisture of 0—10 cm over the six land cover types

较好[25—29]。土壤 CO_2 通量的日变化过程主要取决于土壤温度的变化幅度，这是因为温度能显著影响土壤中酶的活性。在温度较低时，酶的活性受到了限制，随着温度的升高，酶的活性在不断增强，当土壤温度超过酶活性的最适温度后，酶的活性就急剧下降，甚至降解[30—34]。在根呼吸和土壤微生物呼吸的过程中都需要酶的参与，因此温度的变化会影响到土壤呼吸及其对温度的敏感性。本研究证实，不同土地覆被类型下土壤的日呼吸速率与土壤温度存在着显著的相关性。从土壤呼吸速率与土壤温度日变化趋势可以看出，在两种绿洲农田中，土壤呼吸速率变化的趋势几乎与土壤温度变化趋势一致，即在土壤温度达到峰值的前后土壤呼吸速率也达到峰值；两种灌溉林地的情况虽略有不同，但整体上土壤呼吸速率变化的趋势与土壤温度变化的趋势大概一致。从时间上看，土壤呼吸速率变化略滞后于土壤温度变化，这可能与林地植被遮蔽等造成的增温较慢有关；在增温较快的天然荒漠草地和人工梭梭林，土壤呼吸速率的峰值大约维持 2～4 h，这可能与土壤温度持续较高有关。因此，不同土地覆被类型下土壤呼吸速率变化虽然呈现不同的变化趋势，但就任一种土地类型来看，在影响土壤呼吸速率的众多因子中，土壤温度是一天中变化最为显著的因子，是影响土壤呼吸速率变化最为关键的因子，从而呈现出密切的相关性。此外，对 Q_{10} 值的测定，也进一步证实了 Q_{10} 值是反映土壤呼吸速率对土壤温度敏感性的重要指标[35]。本文中不同土地覆被类型的 Q_{10} 值荒漠草地＞灌溉农田＞人工林地，表明在荒漠绿洲过渡带，天然荒漠生态系统对土壤温度变化的响应更为敏感，但是 6 种土地覆被类型之间的差异并不显著，这可能与土壤质地有很大的相关性。6 种土地覆被类型土壤大多是由天然荒漠草地发育而成，土壤基质比较类似，所以对温度的敏感性也相似。总体来看，6 种土地覆被类型 Q_{10} 值较低，说明黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤呼吸对土壤温度的敏感性低于其他多数地区[36]。

其次，土壤含水量也是影响土壤呼吸的重要因素。与土壤温度相比，土壤含水量对土壤呼吸的影响相对复杂得多，会通过直接或间接的途径影响土壤呼吸。土壤水分对土壤呼吸的直接影响主要是通过影响根和微生物的生理过程，对土壤呼吸的间接

影响主要是通过影响底物和氧气的扩散[37]。土壤呼吸是植物根系和土壤微生物生命活动的集中体现，土壤水分会直接参与生物的生理过程，土壤水分过低或过高都会限制土壤呼吸作用[38]。尤其在干旱或半干旱地区，当土壤水分成为胁迫因子时，可能取代土壤温度而成为土壤呼吸速率的主要控制因子[39]。土壤水分对土壤呼吸的影响过程主要是通过水分对植物和微生物的生理活动、微生物的能量供应和水分在体内的再分配、土壤通透性和气体的扩散等作用实现的[8,10,29,40-41]。不同群落类型的植物组成、气象和土壤环境以及植物群落生物量的累计模式等因子都不完全一样，使得植物根系得到的同化产物各不相同，因而群落的土壤呼吸速率也存在差异[10]。本研究中，不同土地覆被类型的日均土壤呼吸速率与表层土壤含水量呈显著的正相关性，即指数关系，且在一定范围内，土壤含水量越高，土壤呼吸速率越大，再次证实土壤呼吸与土壤含水量之间有着重要的联系。此外，土壤水分蒸发大，土壤含水量下降，微生物活性减弱，因而间接影响了土壤呼吸速率的下降。这综合表明，在绿洲荒漠过渡区土壤含水量也是影响土壤呼吸速率的重要因子。

再者，土壤的理化性质也是影响土壤呼吸的重要因素[42-43]。在土壤温度和土壤含水量相对稳定的情况下，土壤有机碳含量是决定土壤 CO_2 释放通量变化的重要因素。不同土地利用类型土壤有机碳含量与土壤呼吸速率变化是一致的，即农田、人工杨树林和樟子松林土壤有机碳含量要显著高于人工梭梭林和天然荒漠草地[44]。土壤养分中的氮、磷、钾含量缺乏与充足时土壤呼吸速率大不一样[45]。土壤质地对土壤呼吸强度也有重要影响，主要是因为土壤粒度不同导致土粒表面吸附与离子交换的能力亦不同，改变了土壤本身的物理结构，从而影响土壤通透性和土壤含水量，进而间接影响土壤的呼吸速率[39,45]。从表 2 可以看出不同土地覆被类型下土壤的粒度组成差异显著，尤其是灌溉农田和林地里土壤黏粉粒含量显著高于梭梭灌木林和天然荒漠草地，这也可能是造成土壤呼吸速率差异的又一重要因素。凋落物层是生态系统中独特的结构层次，在一定程度上影响着生态系统的环境、土壤和植被[46]。地表凋落物作为土壤有机质的主要来源，影响地表环境条件（如温度、湿度等因子），土壤呼吸也产生显著作用[47]。凋落物是土壤有机质输入的主要来源，也是真菌等微生物进行生命活动的物质基础，对土壤的温度、湿度也会产生影响，进而影响到土壤 CO_2 排放[48-49]。周小刚等[50]发现，黄土高原沟壑区王东沟小流域 26 年刺槐人工林添加凋落物使土壤呼吸速率增加 26%，而移除凋落物使土壤呼吸减少 22%。本研究中，人工杨树林和樟子松林土壤呼吸速率要显著高于天然荒漠草地和人工梭梭林，这可能与人工杨树林和樟子松林地表多年形成的较多凋落物层有关。

5　结论

6 种土地覆被的土壤呼吸特征差异显著，呈现不同的波动趋势，存在着明显的昼夜变化。土壤日均呼吸速率灌溉农田最大，其次为人工林地，天然荒漠草地最小。不同土地覆被类型下土壤呼吸特征与水热因子关系密切。其中，土壤温度与土壤的日呼吸速率存在着显著的相关性，且不同土地覆被类型土壤 Q_{10} 值均较低，可见在黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性低于多数地区。土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著的正相关性，说明在绿洲荒漠过渡带土壤含水量也是影响土壤呼吸速率的重要因子。此外，该区域土壤有机碳含量、粒度组成和凋落物含量也是影响土壤呼吸的重要因子。

土壤是陆地生态系统中最大的碳库，土壤呼吸作用是全球维持碳平衡与碳循环的重要生态过程，对全球气候变化带来重要影响。以人类活动为主导的土地覆被变化深刻影响着荒漠绿洲生态系统水土气生的相互作用。人类活动（农田开垦和人工林建立）引起的土壤微环境的改变提高了黑河绿洲荒漠生态系统的土壤呼吸速率，对全球气候变暖带来不利影响。将来怎样合理利用绿洲荒漠土地资源，尽量减少土地 CO_2 排放，是绿洲荒漠系统应考虑的依据之一。近些年来，有关土壤呼吸通量的研究已成为主要热点之一，但大多数集中于某个地带的宏观尺度，而针对于中小尺度单元内的土壤碳循环还鲜见报道。因此，未来需要进一步结合室内培养等方法，深入开展干旱半干旱地区陆地生态系统土壤呼吸研究，剖析土壤中碳循环，以期对揭示区域生态环境演变机理及全球气候变化响应机制提供参考。

参考文献：

[1] Su Y, Zhao W, Su P, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: a case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 117-124.

[2] 常娟,王根绪,王一博. 黑河流域土地利用变化的影响因素——以张掖地区为例[J]. 冰川冻土,2005,27(1):117－123.

[3] Bartelt-Ryser J, Joshi J, Schmid B, et al. Soil feedbacks of plant diversity on soil microbial communities and subsequent plant growth. perspect[J]. Plant Ecology,2005,7:27－49.

[4] Bardgett R D,Frennman C,Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks[J]. ISME Journal,2008,2(8):805－814.

[5] 樊自立,马英杰,艾里希尔·库尔班,等. 试论中国荒漠区人工绿洲生态系统的形成演变和可持续发展[J]. 中国沙漠,2004,24(1):10－16.

[6] 牛瑞雪,赵学勇,刘继亮,等. 黑河中游不同土地覆被类型土壤水文环境和植被特征[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1590－1596.

[7] 董爽,王让会,宁虎森,等. 人工绿洲生态系统中土壤和植被对土地利用变化的响应——以北屯绿洲为例[J]. 干旱区地理,2009,32(4):578－584.

[8] 赵哈林,李玉强,周瑞莲. 沙漠化对沙地土壤呼吸的影响及其对环境变化的响应[J]. 生态学报,2010,30(8):1972－1980.

[9] 寒旱所沙漠化对沙地土壤呼吸及环境变化影响研究取得新进展 [EB/OL]. [2011-03-28]. http://news. hexun. com/2011-03-28/128292953. html

[10] 苏永红,冯起,朱高峰,等. 土壤呼吸与测定方法研究进展[J]. 中国沙漠,2008,28(1):57－65.

[11] 王丹. 不同发育阶段杉木林土壤碳素及其影响因素的研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.

[12] 王铭. 松嫩平原西部盐碱化生态系统土壤呼吸特征及土壤CO_2无机通量研究[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2014.

[13] Hou L,Lei R D,Wang D X,et al. A Review of soil respiration in forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Soil Science,2006,37(3):589－595.

[14] Niu R X,Liu J L,Zhao X Y,et al. Ecological benefit of different revegetated covers in the middle of Hexi corridor,northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 4:5699－5710.

[15] 孙殿超,李玉霖,赵学勇,等. 放牧及围封对科尔沁沙质草地土壤呼吸的影响[J]. 中国沙漠,2015,35(6):1620－1627.

[16] 李娜,颜长珍. 毛乌素沙地现代人为活动的生态环境效应研究进展[J]. 中国沙漠,2015,35(2):487－492.

[17] 解婷婷,苏培玺,高松. 临泽绿洲边缘区棉花群体光合速率、蒸腾速率及水分利用效率[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1425－1431.

[18] 苏培玺,周紫娟,张海娜,等. 荒漠植物沙拐枣群体光合作用及土壤呼吸研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(3):56－64.

[19] Huang B,Wang J G,Gong Y S,et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields. Journal of Agro Environment Science,2006,25(1):156－160.

[20] 周洪华,李卫红,杨余辉,等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J]. 地理科学,2011,31(2):190－195.

[21] 韩广轩,周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. 植物生态学报,2009,33(1):197－205.

[22] 杨帆,买买提艾力·买买提依明,杨兴华,等. 新疆肖塘冬季土壤呼吸特征及影响因素[J]. 中国沙漠,2015,35(1):195－202.

[23] Huang B,Wang J G,Gong Y S,et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. Journal of Agro-Environment Science,2006,25(1):156－160.

[24] 魏书精,罗碧珍,孙龙,等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报,2014(4):18.

[25] 刘绍辉,方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报,1997,17(5):469－476.

[26] 崔玉亭,卢进登,韩纯儒. 集约高产农田生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究[J]. 应用生态学报,1997,8(1):59－64.

[27] Davidson E A,Belk E,Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors cont rolling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology,1998,4:217－227.

[28] Fang C,Moncrieff J B. A model for soil CO_2 production and t ransport:model development[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1999,95:225－236.

[29] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报 2011,31(8):2301－2311.

[30] 王继和,马全林,杨自辉,等. 干旱区沙漠化土地逆转植被的时空格局及其机制研究[J]. 中国沙漠,2004,24(6):729－733.

[31] 吕海波,梁宗锁. 黄土区刺槐林土壤含水量变化对土壤呼吸强度的影响[J]. 水土保持通报,2013,15(2):53－69.

[32] Qi Y,Xu M,Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget:nonlinearity begets surprises[J]. Ecological Modelling, 2002, 153(1/2):131－142.

[33] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸[J]. 生态学报,2008,28(5):1911－1922.

[34] 刘殿君. 极端干旱区泡泡刺群落土壤呼吸对增雨的响应[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.

[35] Luo Y Q,Wan S Q,Hui F,et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature,2001,413(6856):622－625.

[36] Raich J W,Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and it relationship to vegetation and climate[J]. Tellus,1992,44(2):81－99

[37] Luo Y Q,Zhou X H. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬,曲来叶,周玉梅,等,译. 北京:高等教育出版社,2007.

[38] Pangle R E,Seiler J. Influence of seedling roots,environmental factors and soil characteristics on soil CO_2 efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont[J]. Environmental Pollution,2002,116:85－96.

[39] 魏书精,罗碧珍,孙龙,等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报,2013,22(4):689－704.

[40] Edwards N T. Effects of temperature and moisture on carbon

dioxideevolution in a mixed deciduous forest floor[J]. Soil Science Society of America Proceeding, 1975, 39: 361－365.

[41] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(12): 1591－1597.

[42] Fang C, Moncrieff J B. A model for soil CO_2 production and transport: model development[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 95: 225－236.

[43] Priess J A, Koning G H, Veldkam A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nut rient fluxes in Ecuador [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 85: 269－276.

[44] Niu R X, Liu J L, Zhao X Y, et al. Ecological benefit of different revegetated covers in the middle of Hexi corridor, northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 5699－5710.

[45] Mukesh J, Joshi M. Patterns of soil respiration in a temperate grassland of Kumaun Himalaya India[J]. Journal of Tropical Forest Science, 1995, 8(2): 185－195.

[46] 时秀焕，张晓平，梁爱珍，等. 土壤 CO_2 排放主要影响因素的研究进展[J]. 土壤通报，2010，41(3)：761－768.

[47] 刘绍辉，方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报，1997，17(5)：469－476.

[48] Wang Y D, Wang H M, Ma Z Q, et al. Contribution of aboveground litter decomposition to soil respiration in a subtropical coniferous plantation in Southern China[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 45(2): 137－147.

[49] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, et al. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO_2 efflux in an old growth coniferous forest[J]. Biogeochemistry, 2005, 7(1): 231－256.

[50] 周小刚，郭胜利，车升国，等. 黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. 生态学报，2012，32(7)：2150－2157.

Soil Respiration Characters and Its Response to Hydrothermic Factors over Different Land Cover Types in the Middle Reaches of the Heihe River Basin

Niu Ruixue[1], Liu Jiliang[2], Hu Yanping[3], Fu Ying[1]

(1. *Institute of Scientific and Technical Information of Gansu, Lanzhou* 730000, *China*; 2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 3. *Lanzhou Petrochemical College of Vocational Technology, Lanzhou* 730060, *China*)

Abstract: The soil respiration and its response to hydrothermic factors over six land cover types (e.g., old irrigation farm land, new irrigation farm land, poplar plantation, pine plantation, *Haloxylon ammodendron* plantation, and desert grassland) have been studied in the middle reaches of the Heihe River Basin. The results show that the soil respirations are significant different over six land cover types. The soil respiration over irrigation farmland is much larger than that over artificial woods plantation (e.g., poplar plantation, pine plantation); and that over artificial woods plantation is larger than over desert grassland and *H. ammodendron* plantation. The soil respiration rate is proportional to the surface temperature, with the Q_{10} value between 1.14 and 1.31, which is below the world average level. Furthermore, the soil respiration shows an exponential increase with soil moisture. The characteristics of soil respiration are closely related to the hydrothermic factors over the six land cover types, indicating that the land changes dominated by human activities can significantly affect the interactions of water, soil, air and biological factors in desert oasis ecological system.

Key words: middle reaches of the Heihe River Basin; land cover; soil respiration; hydrothermic factors