

大气湍流非平衡态的垂直速度 - 热通量耦合效应：观测验证与模型优化

刘丽珺^{1,2}, 梁友嘉^{3*}, 王 瑾⁴

¹武汉商学院信息工程学院, 湖北 武汉

²中国气象局秦岭和黄土高原生态环境重点开放实验室, 陕西 西安

³武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉

⁴中国气象局陕西省人工影响天气中心, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月5日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

大气湍流的垂直速度与水热通量(感热与潜热)之间存在交叉耦合效应, 借助非平衡态热力学理论和 Onsager 倒易关系可以推导其耦合系数的函数形式, 但受不同观测条件影响缺乏普适性。本文使用黑河流域盈科绿洲均质农田下垫面的气象及通量观测数据, 验证和拓展该交叉耦合系数函数的适用性。在垂直速度 - 水热通量耦合效应的物理机制基础上, 引入粒子群优化算法提高耦合系数的拟合精度, 建立更合理的经验函数方程; 并以潜热通量为例, 通过上升/下沉气流条件下潜热通量的估算与观测对比, 评估耦合修正前后的模型精度差异。发现采用新拟合的耦合系数后, 潜热通量在不同垂直运动条件下的估算值与观测值之间的系统偏差由21%减小至10%, 这反映了垂直速度耦合效应在水热(尤其是潜热)通量输送过程中的重要性, 表明考虑耦合项能够明显改善对该均质农田下垫面实际湍流通量的估算性能。基于该站点实测资料验证和优化的交叉耦合系数模型, 适用于表征此类下垫面大气湍流中可观测且可量化的垂直速度耦合机制。这为深入理解湍流输送特征及改进经典湍流参数化方案提供了参考, 也为在高原或非均匀下垫面等复杂环境下开展湍流耦合效应研究提供了初步的科学参考和方法借鉴。

关键词

大气近地面层, 湍流输送, 潜热, 垂直速度, 交叉耦合, 粒子群优化

Vertical Velocity-Heat Flux Coupling Effects in Nonequilibrium Atmospheric Turbulence: Observational Validation and Model Optimization

*通讯作者。

文章引用: 刘丽珺, 梁友嘉, 王瑾. 大气湍流非平衡态的垂直速度-热通量耦合效应: 观测验证与模型优化[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(9): 1340-1349. DOI: 10.12677/ag.2025.159124

Lijun Liu^{1,2}, Youjia Liang^{3*}, Jin Wang⁴

¹School of Information Engineering, Wuhan Business University, Wuhan Hubei

²Key Open Laboratory of Qinling and Loess Plateau Ecology and Environment, China Meteorological Administration, Xi'an Shaanxi

³School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

⁴Shaanxi Artificial Weather Influence Center of China Meteorological Administration, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 5th, 2025; accepted: Sep. 16th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

There is a cross-coupling effect between the vertical velocity and water-heat fluxes (sensible and latent heat) of atmospheric turbulence. The functional form of the coupling coefficients can be deduced with the help of the nonequilibrium thermodynamic theory and the Onsager reciprocity relation, but it lacks universality depending on the different observation conditions. The applicability of the cross-coupling coefficient function is verified and extended in this paper by using the meteorological and flux observation data from homogeneous farmland surfaces in the Yingke Oasis Station of the Heihe River Basin. Based on the physical mechanism of velocity-water-heat flux coupling effect, a particle swarm optimization algorithm is introduced to improve the fitting accuracy of the coupling coefficients, and a more reasonable empirical functional equation is established; using latent heat flux as an example, the difference in model accuracy before and after the coupling modification is assessed by comparing the estimation of latent heat fluxes under the updraft/sinking airflow conditions with observations. It is found that the systematic deviation between the estimated and observed heat fluxes under different vertical motion conditions is reduced from 21% to 10% with the newly fitted coupling coefficients, which reflects the importance of the vertical velocity coupling effect in the transport of water-heat fluxes (particularly latent heat), and suggests that the consideration of the coupling term can significantly improve the estimation performance of the actual turbulent fluxes over this homogeneous farmland surface. The validated and optimized cross-coupling coefficient model based on measured data from this site is suitable for characterizing the observable and quantifiable vertical velocity coupling mechanism in atmospheric turbulence over such surfaces. This provides a reference for a deeper understanding of the turbulent transport characteristics and improvement of the classical turbulence parameterization scheme, as well as preliminary scientific guidance and methodological insights for the study of turbulence coupling effects in complex environments such as plateaus or non-uniform subsurface.

Keywords

Atmospheric Near-Surface Layer, Turbulent Transport, Latent Heat, Vertical Velocity, Cross-Coupling, Particle Swarm Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气湍流是近地面边界层中的关键组分，对理解能量、水汽交换以及区域气候和环境变化都具有重要作用。随着观测手段和理论深度的提升，发现大气湍流在非均匀、快速演化的气象条件下通常表现出明显的非平衡态特征[1][2]。胡隐樵等(2004)[3]、左洪超等(2005)[4]和 Chen 等(2007, 2013)[5][6]先后提

出了将非平衡态热力学思想应用于大气湍流研究的理念, 阐明了在外部强迫下湍流的熵生成与能量耗散机制。这拓展了传统湍流统计理论的研究边界[7], 为揭示高原等复杂下垫面区域的垂直速度 - 热通量交叉耦合效应和能量平衡分析提供了科学基础。

近年来, 观测与数值试验不断验证了垂直速度对水热通量的修正作用[8]。在无风或局地强迫(如尘卷风、雷暴出流)条件下, 部分湍流能量的生成与耗散往往并不同步, 能量级联演化也可能出现中断或不平衡现象[9]-[11]。因此, Buckingham π 量纲理论开始用于构建耦合系数函数形式, 虽在特定观测试验与气候带取得了良好适用性, 但其普适性仍有待提升[12][13], 对于湍流耗散率等关键参数的表征仍存在较大不确定性。例如, Nilsson 等(2016)和 Schröder 等(2024)基于激光雷达与湍流探针数据发现, 大气潮湿对流和边界层再生会显著改变耗散率的时空分布, 增大了湍流通量估算不确定性[14][15]。因此, 需要将非线性动力学与混沌分析方法引入更大空间和更高时空分辨率的数值模式中, 以厘清湿对流、云微物理过程、边界层辐射等多过程交互对湍流输送的影响机制[16]-[18]。在地球系统模式中增补非平衡项或耦合通量修正项, 为雷诺应力和涡黏性等经典统计模型提供了更灵活的适用条件[19]; 将 Buckingham π 量纲分析与机器学习方法结合, 从大样本观测中提取湍流耦合通量的特征模式[20]。这为大气湍流精细化模拟、能量闭合分析和观测 - 理论匹配提供了新思路。

黑河流域的地形 - 下垫面特征与多种生态环境类型适合开展高质量试验观测[21]。在“黑河综合遥感联合试验”与“黑河流域遥感 - 地面观测同步试验”公开发布的试验数据基础上, 聚焦典型下垫面与气象条件下的湍流输送过程[22], 系统评估垂直速度与热通量之间交叉耦合的机理和适用范围。首先, 收集盈科绿洲站的实测通量与气象数据, 结合非平衡态热力学与耦合效应理论进行资料整合分析, 检验原有公式的精度及稳定性; 再引入粒子优化算法对耦合系数进行重新拟合, 构建更合理、普适性更强的经验方程; 最后对比拟合 - 观测结果, 评估改进后的参数化模型的表现性能, 用于探讨交叉耦合效应在边界层不同湍流条件下的适用性。本研究为大气湍流非平衡态特性理解和复杂环境能量平衡研究提供了参数化方案与科学参考。

2. 实验方法

2.1. 实验站场

“黑河综合实验”自 2007 年开始在阿柔、盈科、关滩等区域陆续建设了覆盖林、草、农田等下垫面的地面观测站, 开展了涡动相关通量与水热过程的数据观测, 相应的标准化数据处理流程确保了多站点观测数据的可比性与一致性。例如, 在数据处理方面采用改进的 EdiRe 程序对原始观测数据进行异常值及野点剔除、倾斜修正、超声虚温修正、时间滞后校正、频率响应修正以及空气密度效应(WPL)修正等标准化步骤[23], 由此得到 30 分钟分辨率的通量数据(Level-1); 然后对 Level-1 产品进行大气状态平稳性检验、总体湍流特征检验及湍流通量统计特征分析, 形成高精度的感热 - 潜热通量及 CO_2 通量数据(Level-2)。本研究选取了黑河中游张掖市盈科灌区的盈科绿洲站($100^\circ 24' 37.2''\text{E}$, $38^\circ 51' 25.7''\text{N}$, 海拔 1519 m), 其周边地势开阔平坦, 周围防风林呈东西向 500 m、南北向 300 m 间隔分布, 满足了理想的农田生态系统观测条件。获取了该站 2008~2010 年连续的涡动相关水热通量数据[24], 数据来自于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>), 均已经过精细化处理与质量控制。还收集了“黑河综合遥感联合试验”及“黑河流域遥感 - 地面观测同步试验”所公开发布的部分辅助数据用于模型研究[25]。

2.2. 垂直速度 - 热通量的耦合关系

大气湍流中的垂直速度(V_z)与温度(T)、水汽混合比(q)之间的交叉耦合是理解水热通量输送机理的核心。感热通量(H)和潜热通量(E)均可分为: 1) 由热量或水汽的垂直梯度所决定的湍流通量; 2) 垂直速度对感热或潜热通量的耦合通量。理想情况下(如水平均匀、垂直速度为零的下垫面), 垂直速度对通量的修正消失。

Chen 等(2007, 2013)对这些耦合系数形式进行了系统研究(公式(1)、(2)) [5] [6], 并采用垂直湍流输送系数 k 与感热/潜热通量的经验关系和其一般性表达式来确定垂直速度对湍流通量的贡献(公式(3a)~(3c))。

$$H = \alpha V_z + \beta \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

$$E = \gamma V_z + \delta \frac{\partial q}{\partial z} \quad (2)$$

$$k = \frac{H}{V_z} \quad (3a)$$

$$k = \frac{E}{V_z} \quad (3b)$$

$$k = f(T, q) \quad (3c)$$

其中, α 、 β 、 γ 、 δ 为耦合系数, z 为高度。通过实测数据检验后, 发现该输送系数与温度、水汽混合比之间存在特定函数形式。此外, 原始函数形式拟合耦合系数时存在偏差, 导致估算的水汽混合比通量斜率难以准确趋近 1, 本研究选用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)提升垂直速度 - 热通量耦合函数的拟合精度。该方法能在多维搜索空间中以较快收敛速度和良好的全局寻优能力迭代寻求最优解, 可有效降低拟合误差和改善耦合修正效果。为与待比较的数据处理保持一致, 使用 PSO 前剔除了满足下列条件的数据: 摩擦速度 $u_* < 0.1 m \cdot s^{-1}$; 水汽通量 $\lambda E < 10 W \cdot m^{-2}$; 感热通量 $H < 10 W \cdot m^{-2}$, 以及温度和水汽梯度与感热或潜热通量方向相矛盾的观测值。筛选数据后采用分段拟合方法来提高拟合准确性, 横坐标为无量纲参数 W/u_* , 纵坐标为垂直速度耦合系数 K_{VW} 。本研究定义垂直速度耦合系数 K_{VW} 为垂直速度 V_z (或 W) 对湍流输送系数 k 的特定贡献部分, 即 $k_{\text{coupling}} = K_{VW}$ 。根据量纲分析及公式(1)、(2)、(3a)、(3b), K_{VW} 应具有速度量纲 ($m \cdot s^{-1}$), 与传统的湍流扩散系数量纲一致。该部分数据主要反映上升气流(不稳定条件), 多数散点集中在较小的 W/u_* 区域, 通过 PSO 对各分段数据进行拟合后, 在捕捉垂直速度耦合对湍流通量的影响方面具有良好的全局拟合与收敛特性。粒子群优化算法(PSO)的具体参数设置如下: 种群规模为 50, 最大迭代次数为 200 次, 控制参数均设置为 2.0, 惯性权重采用线性递减策略, 初始值为 0.9, 最终值为 0.4。算法的收敛准则设定为连续 10 次迭代最优适应度值变化小于 $1e^{-6}$ 或达到最大迭代次数。适应度函数采用均方根误差(RMSE)。

进一步识别和分析交叉耦合现象关系(公式(4)), 引入湿度参数并结合 Buckingham 量纲分析探讨耦合系数的可能函数形式(公式(5)、(6)):

$$k_{\text{coupling}} = f(V_z, T, q) \quad (4)$$

$$k_{\text{coupling}} = g(\text{boundary layer parameters}) \quad (5)$$

$$k_{\text{coupling}} = h(V_z) \quad (6)$$

参数 α 和 β 随 $\ln(V_z)$ 呈对数函数关系, 在特定条件下出现分叉现象。为验证耦合作用将包含耦合修正和不含耦合修正所得到的水汽通量进行对比, 用线性回归斜率(理论值为 1)衡量修正前后估算通量与实测湍流通量之间的偏差大小。通过以上方法, 在大气湍流非平衡态理论框架下确立垂直速度 - 热通量耦合关系和改进对水热通量输送机制的认识。

2.3. 垂直速度 - 热通量的耦合效应验证

为检验耦合效应关系式的可信度, 以潜热通量为例, 对比无耦合修正的潜热通量与考虑垂直速度耦

合修正后的潜热通量之间的差异。 λE_E 为近地面层中不考虑垂直速度耦合效应时观测得到的潜热通量； λE_K 为经耦合效应修正后得到的最终潜热通量； λE_W 为由垂直速度对潜热通量的耦合项所贡献的影响，用于表示相应的观测及修正公式(公式(7)~(9))可表示为：

$$\lambda E_E = \rho \lambda \overline{w'q'} \quad (7)$$

$$\lambda E_K = -\rho \lambda K_v \frac{\partial q}{\partial z} \quad (8)$$

$$\lambda E_W = -\rho \lambda W q_w \exp(\alpha^* W/u_*) \quad (9)$$

其中， ρ 为空气密度， λ 为汽化潜热， w' 和 q' 分别为垂直风速和比湿的脉动分量， K_v 为垂直速度耦合系数， q_w 表示下垫面与近地面层的含湿量差异， α 为拟合系数， W 为平均垂直速度， u_* 为摩擦速度。如下为本文的流程图(图 1)。

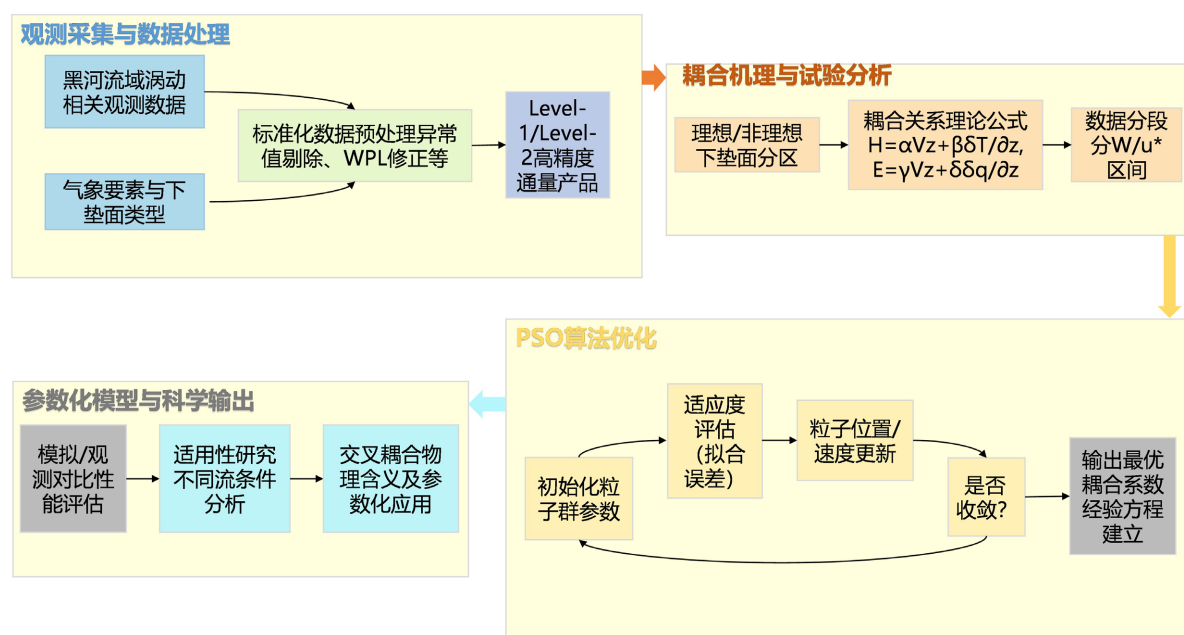


Figure 1. Research framework flowchart

图 1. 研究框架流程图

3. 结果分析

3.1. 垂直速度 - 热通量的耦合关系验证

在观测高度 $z = 10$ m、上升气流($W > 0$)条件下，剔除异常数据前后的垂直速度耦合系数 K_w 与 W/u_* 之间的散点分布拟合存在明显区别(图 2)。剔除前数据较分散，局部区域存在与整体趋势偏离较大的离群点；质量控制后数据分布更集中，拟合曲线更平滑，更准确地揭示了上升气流对潜热通量修正效果的关联性。 $z = 2$ m 且下沉气流($W < 0$)条件下也存在较大差异(图 3)，原始数据在 $W/u_* \approx -2$ 附近耦合系数突然增大，部分离群点对于拟合曲线的影响较显著，剔除异常数据后 K_w 随 W/u_* 的变化规律更明显且曲线更平滑，反映了下沉气流对潜热通量修正的真实特征。上升/下沉气流在剔除异常数据和质量控制后的函数关系均能得到准确呈现。对揭示湍流场垂直运动对水热通量修正机理而言，剔除异常观测值是关键步骤，这为耦合系数建模和水热通量输送过程分析提供了可信的数据基础。

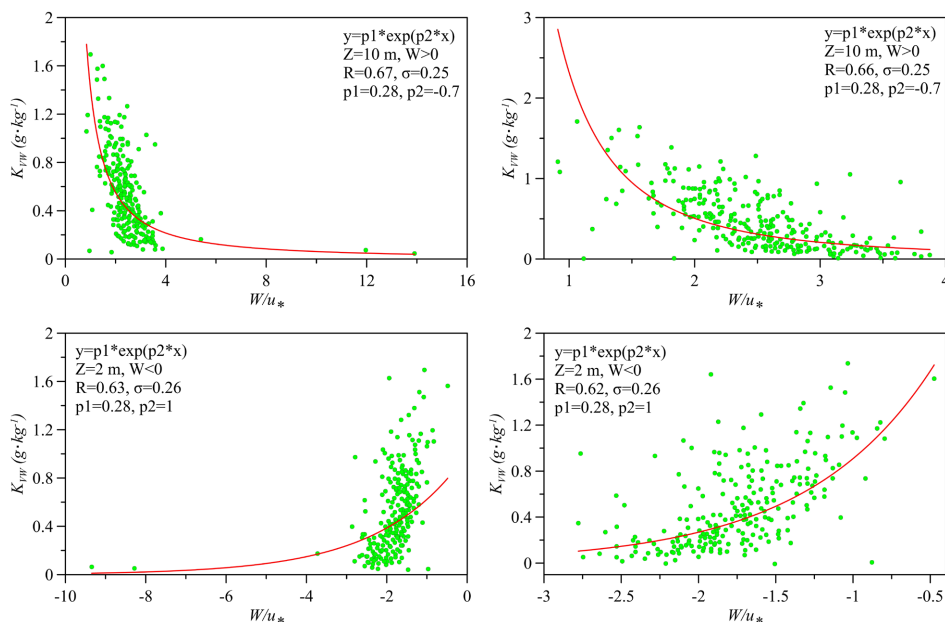


Figure 2. Functional relationship between vertical velocity coupling coefficient $K_{vw} (m \cdot s^{-1})$ and dimensionless parameter W/u_* before (left) and after (right) removal ($z = 10 \text{ m}$, $W > 0$)

图 2. 剔除前(左)与剔除后(右)的垂直速度耦合系数 $K_{vw} (m \cdot s^{-1})$ 与无量纲参数 W/u_* 间的函数关系($z = 10 \text{ m}$, $W > 0$)

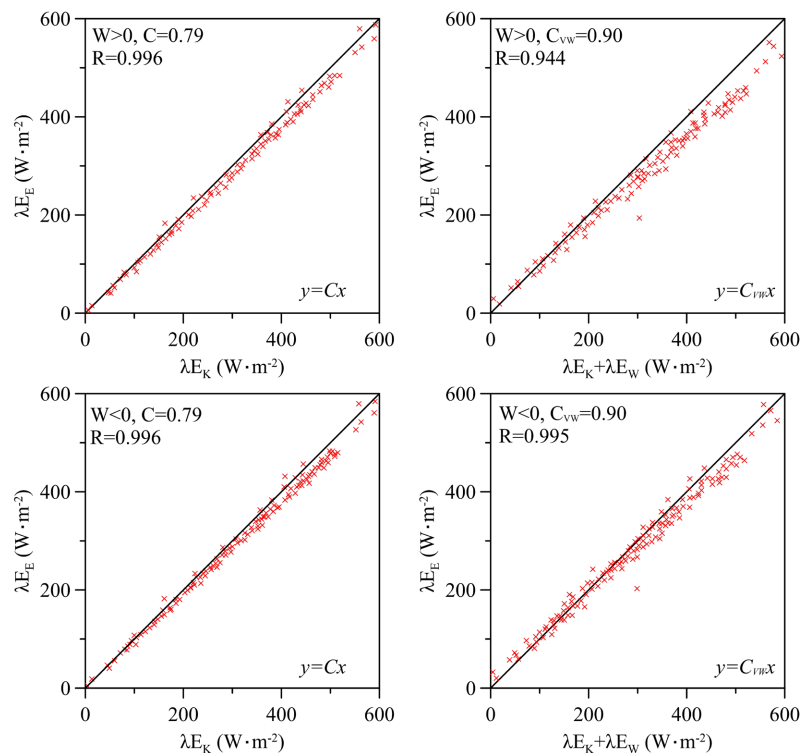


Figure 3. Functional relationship between vertical velocity coupling coefficient $K_{vw} (m \cdot s^{-1})$ and dimensionless parameter W/u_* before (left) and after (right) removal ($z = 2 \text{ m}$, $W < 0$)

图 3. 剔除前(左)与剔除后(右)的垂直速度耦合系数 $K_{vw} (m \cdot s^{-1})$ 与无量纲参数 W/u_* 间的函数关系($z = 2 \text{ m}$, $W < 0$)

应用 PSO 算法将观测数据与 3764 种备选函数进行拟合, 以寻求相关性显著、形式简便的通用方程。为刻画湿度随 W/u_* 的变化特征, 定义湿度参数为 $\chi = f(W/u_*)$ 的指数函数, 以此获取拟合的两者函数关系 (表 1)。决定系数(R^2)和相关系数(R)表明, 剔除前的数据拟合精度更高(R^2 和 R 均更大), 且两者均能反映 K_{vw} 与 W/u_* 之间的线性/非线性相关程度, 后续分析中维持对剔除前数据集所得的拟合关系。对 3764 种函数对比筛选并借助粒子群算法优选出指数函数形式, 刻画了垂直速度耦合系数与无量纲参数的函数关系。

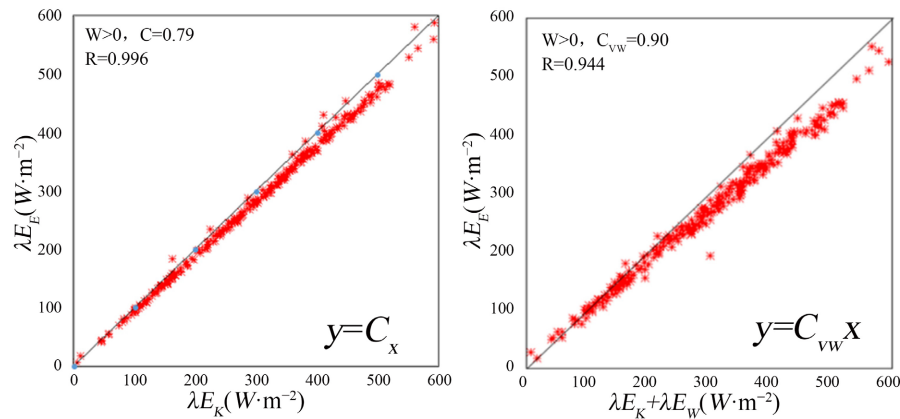
Table 1. Functional relationship between vertical velocity coupling coefficient $K_{vw} (m \cdot s^{-1})$ and dimensionless parameter W/u_* fitted using particle swarm optimization algorithm

表 1. 基于粒子群优化算法拟合的垂直速度耦合系数 $K_{vw} (m \cdot s^{-1})$ 与无量纲参数 W/u_* 的函数关系

初始条件	数据处理	函数方程	标准误差	平方差和	相关系数	拟合系数	决定系数
$z = 10 \text{ m}, W > 0$	剔前	$y = 2.8 * \text{Exp}(-0.7 * x)$	0.25	17.6	0.67	0.45	0.45
	剔后	$y = 2.8 * \text{Exp}(-0.7 * x)$	0.25	17.6	0.66	0.44	0.44
$z = 2 \text{ m}, W < 0$	剔前	$y = 2.8 * \text{Exp}(x)$	0.26	19.1	0.63	0.4	0.4
	剔后	$y = 2.8 * \text{Exp}(x)$	0.26	19.1	0.62	0.39	0.39

由表 1 可知, 两种观测高度及上升/下沉气流条件下, 函数形式均可表示为: $K_{vw} = q_w \exp(\alpha * W/u_*)$, 优化算法同样采用 PSO。 α 值分别在 $z = 10 \text{ m}$ 为 -0.7 , $z = 2 \text{ m}$ 为 1 。值得注意的是, 虽然 $p2$ 值 ($z = 10 \text{ m}$, $p2 = -0.7$; $z = 2 \text{ m}$, $p2 = 1$) 随高度和气流方向不同发生变化, 但 $p1$ 值在两高度下均为 2.8 , 可能的原因是农田绿洲区站点下垫面水平相对均一, 使垂向分层变化不显著, 资料处理中不同高度的观测数据在质控、筛选及拟合中所采用的流程可能未体现出差异性, 即 $p1$ 缺乏分层特征。PSO 优化拟合能精确刻画垂直速度对热通量的修正, 但需在更复杂的环境条件及更完备的分层观测基础上探讨耦合系数与观测场的关系。

3.2. 垂直速度 - 潜热通量耦合效应的实验验证

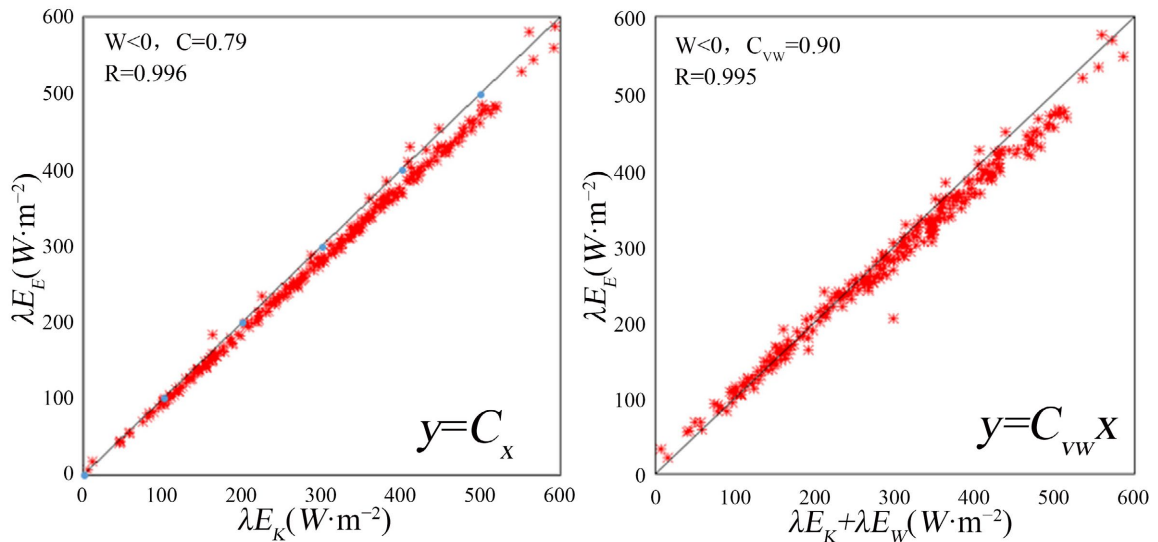


注: 左图: 未修正估算值 (λE_K) vs. 观测值 (λE_E), 未修正回归斜率 = C ; 右图: 耦合修正后估算值 ($\lambda E_K + \lambda E_w$) vs. 观测值 (λE_E), 修正回归斜率 = C_{vw} 。

Figure 4. Comparison of latent heat flux ($W \cdot m^{-2}$) correction effects without (left) and with (right) consideration of vertical velocity coupling effects under updraft conditions ($W > 0$)

图 4. 上升气流条件下 ($W > 0$) 未考虑 (左) 和考虑 (右) 垂直速度耦合效应的潜热通量 ($W \cdot m^{-2}$) 修正效果对比

两种气流条件下垂直速度耦合效应对潜热通量的影响存在差异(图 4 和图 5)。若不考虑垂直速度耦合时,水汽梯度估算的潜热通量(λE_E)与涡动相关观测的潜热通量(λE_K)的线性回归斜率约为 0.79, 相关系数 R 高达 0.996; 根据经典大气边界层湍流输送 K 理论, 此理论斜率应为 1, 水汽梯度估算值总体偏大。加入垂直速度耦合修正项后, 回归斜率增至 0.90 (提升约 11%), 更接近理想值, 但 R 值略有降低, 分别由 0.996 降至 0.944 ($W > 0$)和 0.995 ($W < 0$)。相对均匀的下垫面与高质量观测资料可能导致耦合效应的修正幅度不明显, 需要在非均匀下垫面探讨垂直速度耦合效应对潜热通量估算的影响。



注: 左图: 未修正估算值(λE_K) vs. 观测值(λE_E), 未修正回归斜率 = C ; 右图: 耦合修正后估算值($\lambda E_K + \lambda E_w$) vs. 观测值(λE_E), 修正回归斜率 = C_{vw} 。

Figure 5. Comparison of latent heat flux ($W \cdot m^{-2}$) correction effects without (left) and with (right) consideration of vertical velocity coupling effects under descending airflow conditions ($W < 0$)

图 5. 下降气流条件下($W < 0$)未考虑(左)和考虑(右)垂直速度耦合效应的潜热通量($W \cdot m^{-2}$)修正效果对比

4. 结论和讨论

本研究以验证垂直速度对潜热通量耦合效应的经验函数为主要目标, 对比涡动相关法观测数据与基于经典相似性理论的梯度估算结果, 探讨了垂直速度耦合效应在潜热通量估算中的重要性。主要结论与讨论如下:

1) 耦合效应作用。通过对比耦合项在潜热通量估算中的作用发现, 加入耦合修正后的水汽梯度估算与观测值的线性拟合斜率提高了约 11%, 在热力作用较明显的条件下垂直速度对潜热通量的修正作用不可忽视。

2) 新经验函数构建。利用粒子优化算法建立了新的经验函数方程, 发现以 W/u_* 作为自变量时具有较好的指数关系。当垂直速度和摩擦速度比值相等时, 在 2 m 与 10 m 高度处比湿常数同为 2.8, 下垫面较为均一的情况下尚未能体现其与高度 z 的明显关系。

3) 地形与均匀下垫面影响。实验区地形相对平坦、下垫面较均一, 未能明显观测到零耦合效应高度, 也未呈现出耦合效应在不同高度上的显著差异特征。需要在更复杂的非均匀的下垫面条件下检验耦合效应。

4) 对现有理论的支持与局限。本研究在一定程度上印证了大气湍流非平衡态热力学理论中关于水热

通量耦合效应及相应关系式。由于实测资料局限于特定区域和采样条件,耦合效应的普适性和适用性仍需更广范围的证据补充与验证。

在地形复杂的非均匀下垫面进行观测与数值模拟,并对比不同气候条件及季节变化对揭示垂直速度耦合效应影响的潜热通量修正机理和量级。除垂直速度外,还可引入辐射、地表温度、植物冠层结构等多变量进行耦合分析,构建更综合的潜热通量估算体系[26]。通过数值模式(如大涡模拟)与实测数据的叠加分析可优化或修正现有经验函数。机器学习优化算法可挖掘复杂耦合关系[27],为地-气相互作用研究提供支持。本研究表明垂直速度耦合效应在潜热通量输送中具有重要作用。相似性理论与实测的对比显示耦合效应修正并不在所有情形下出现显著差异,但随着观测区域与条件的扩展以及数值模式和方法的不断完善,垂直速度的耦合效应将成为提升潜热通量估算精度的重要方向。虽然本研究以潜热通量为例验证了垂直速度耦合效应的修正效果,但基于非平衡态热力学理论(公式(1)),该耦合机制同样适用于感热通量(H)。未来研究将在感热通量上应用相同的优化方法,进一步验证该理论的普适性。作为大气湍流非平衡态热力学理论的一部分,耦合效应研究涉及湍流输送机理、能量闭合问题等深层次理论议题,建议在更广泛的实验与数值模拟基础上完善和深化理论探讨。

致 谢

数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn>)。

基金项目

秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室 2024 年开放基金课题(2024Y-14)和湖北省教育厅哲学社会科学基金项目(24G093)资助。

参考文献

- [1] Hu, Y. and Chen, J. (2009) Nonequilibrium Thermodynamic Theory of Atmospheric Turbulence. In: Lang, P.R. and Lombargo, F.S., Eds., *Atmospheric Turbulence, Meteorological Modeling and Aerodynamics*, Nova Science Publishers, 59-110.
- [2] Wu, W. and Wang, J. (2020) Nonequilibrium Thermodynamics of Turbulence and Stochastic Fluid Systems. *New Journal of Physics*, **22**, Article ID: 113017. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/abc7d2>
- [3] 胡隐樵, 左洪超. 边界层湍流输送的若干问题和大气线性热力学[J]. 高原气象, 2004(2): 132-138.
- [4] 左洪超, 胡隐樵. 湍流输送的非线性热力学性质[J]. 地球物理学报, 2005(6): 20-24.
- [5] Chen, J., Hu, Y., Lü, S. and Yu, Y. (2013) Experimental Demonstration of the Coupling Effect of Vertical Velocity on Latent Heat Flux. *Science China Earth Sciences*, **56**, 684-692. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4574-1>
- [6] Chen, J., Hu, Y. and Zhang, L. (2007) Principle of Cross Coupling between Vertical Heat Turbulent Transport and Vertical Velocity and Determination of Cross Coupling Coefficient. *Advances in Atmospheric Sciences*, **24**, 89-100. <https://doi.org/10.1007/s00376-007-0089-7>
- [7] Muschik, W. (1993) Fundamentals of Nonequilibrium Thermodynamics. In: *Non-Equilibrium Thermodynamics with Application to Solids: Dedicated to the Memory of Professor Theodor Lehmann*, Springer, 1-63.
- [8] Karasewicz, M., Waclawczyk, M., Ortiz-Amezcu, P., Janicka, Ł., Poczta, P., Kassar Borges, C., et al. (2024) Investigation of Non-Equilibrium Turbulence Decay in the Atmospheric Boundary Layer Using Doppler Lidar Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **24**, 13231-13251. <https://doi.org/10.5194/acp-24-13231-2024>
- [9] Obligado, M. and Vassilicos, J.C. (2019) The Non-Equilibrium Part of the Inertial Range in Decaying Homogeneous Turbulence. *Europhysics Letters*, **127**, Article 64004. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/127/64004>
- [10] Steiros, K. (2022) Balanced Nonstationary Turbulence. *Physical Review E*, **105**, Article ID: 035109. <https://doi.org/10.1103/physreve.105.035109>
- [11] Steiros, K. (2022) Turbulence near Initial Conditions. *Physical Review Fluids*, **7**, Article ID: 104607. <https://doi.org/10.1103/physrevfluids.7.104607>
- [12] Li, P. and Wang, Z.H. (2020) A Nonequilibrium Thermodynamic Approach for Surface Energy Balance Closure. *Geophysical*

- Research Letters*, **47**, e2019GL085835. <https://doi.org/10.1029/2019gl085835>
- [13] Bowen, P. and Thurn, J. (2022) Consistent and Flexible Thermodynamics in Atmospheric Models Using Internal Energy as a Thermodynamic Potential. Part I: Equilibrium Regime. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **148**, 3730-3755. <https://doi.org/10.1002/qj.4385>
 - [14] Nilsson, E., Lohou, F., Lothon, M., Pardyjak, E., Mahrt, L. and Darbieu, C. (2016) Turbulence Kinetic Energy Budget during the Afternoon Transition—Part I: Observed Surface TKE Budget and Boundary Layer Description for 10 Intensive Observation Period Days. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 8849-8872. <https://doi.org/10.5194/acp-16-8849-2016>
 - [15] Schröder, M., Bätge, T., Bodenschatz, E., Wilczek, M. and Bagheri, G. (2024) Estimating the Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate from One-Dimensional Velocity Measurements in Time. *Atmospheric Measurement Techniques*, **17**, 627-657. <https://doi.org/10.5194/amt-17-627-2024>
 - [16] Huang, Y.N. and Durst, F. (2001) A Note on Thermodynamic Restriction on Turbulence Modelling. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **22**, 495-499. [https://doi.org/10.1016/s0142-727x\(01\)00118-7](https://doi.org/10.1016/s0142-727x(01)00118-7)
 - [17] Waclawczyk, M., Gozigan, A.S., Nzotungishaka, J., Mohammadi, M. and P. Malinowski, S. (2020) Comparison of Different Techniques to Calculate Properties of Atmospheric Turbulence from Low-Resolution Data. *Atmosphere*, **11**, Article 199. <https://doi.org/10.3390/atmos11020199>
 - [18] Vassilicos, J.C. (2015) Dissipation in Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **47**, 95-114. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014637>
 - [19] Launder, B.E. and Sharma, B.I. (1974) Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, **1**, 131-137. [https://doi.org/10.1016/0094-4548\(74\)90150-7](https://doi.org/10.1016/0094-4548(74)90150-7)
 - [20] Waclawczyk, M., Nowak, J.L., Siebert, H. and Malinowski, S.P. (2022) Detecting Nonequilibrium States in Atmospheric Turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **79**, 2757-2772. <https://doi.org/10.1175/jas-d-22-0028.1>
 - [21] 李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感——地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008(9): 897-914.
 - [22] Wulfmeyer, V., Senff, C., Späth, F., *et al.* (2023) Profiling the Molecular Destruction Rates of Temperature and Humidity as Well as the Turbulent Kinetic Energy Dissipation in the Convective Boundary Layer. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **2023**, 1-47.
 - [23] Luce, H. and Yabuki, M. (2025) Turbulence Kinetic Energy Dissipation Rate Estimated from a Windcube Doppler Lidar and the LQ7 1.3 GHz Radar Wind Profiler in the Convective Boundary Layer. *Atmospheric Measurement Techniques*, **18**, 1193-1208. <https://doi.org/10.5194/amt-18-1193-2025>
 - [24] 刘强, 柳钦火, 马明国, 等. 黑河综合遥感联合试验: 盈科灌区绿洲站涡动相关通量数据集[Z]. 国家青藏高原数据中心, 2015.
 - [25] 李新, 李小红, 李增元. 黑河综合遥感联合试验数据发布[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(6): 761-765.
 - [26] Xian, J., Lu, C., Lin, X., Yang, H., Zhang, N. and Zhang, L. (2024) Directly Measuring the Power-Law Exponent and Kinetic Energy of Atmospheric Turbulence Using Coherent Doppler Wind Lidar. *Atmospheric Measurement Techniques*, **17**, 1837-1850. <https://doi.org/10.5194/amt-17-1837-2024>
 - [27] Ortiz-Amezcu, P., Andújar-Maqueda, J., Manninen, A.J., Pentikäinen, P., O'Connor, E.J., Stachlewska, I.S., *et al.* (2022) Dynamics of the Atmospheric Boundary Layer over Two Middle-Latitude Rural Sites with Doppler Lidar. *Atmospheric Research*, **280**, Article ID: 106434. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106434>