

異なる低酸素トレーニングプログラムによる生理応答 —駿河台大学陸上競技部での観察研究—

邑 木 隆 二・竹 井 尚 也 (東京大学)

I 序論

アスリートに対する運動処方では、競技における優位性を多く獲得するために、トレーニング効果を高めるための様々な工夫がなされる。数多ある工夫の中でも、低酸素環境下での運動トレーニング（低酸素トレーニング）は、通常酸素環境下での運動トレーニングとは大きく異なる急性の生理応答およびトレーニング効果をもたらす方法として注目を集めている (Brocherie et al., 2018; Faiss et al., 2013b; Lundby et al., 2009; Vogt et al., 2001)。さらに近年では、人工環境室や低酸素空気発生装置などの人工的な低酸素環境が普及し、山岳部でない都市部においても低酸素トレーニングが実施可能であり、その利便性は飛躍的に高まっている (Girard et al., 2020a)。山岳部に滞在し、運動トレーニングを行う古典的な低酸素トレーニング方策（高地トレーニング）では、長時間・長期間（12時間以上/日、2週間以上）の低酸素曝露により、血中ヘモグロビン濃度の上昇といった主に中枢の生理的適応をもたらす (Saunders et al., 2013; Wilber, 2007)。一方で、人工的な低酸素環境を用いて運動トレーニング時にのみ低酸素環境に曝露される低酸素トレーニング方策は、間欠的低酸素トレーニングと呼ばれ、骨格筋での代謝関連の酵素活性の向上や毛細血管密度の上昇といった主に末梢の骨格筋での生理学的適応をもたらす (Girard et al., 2020)。特に、間欠的低酸素トレーニングでの生理応答およびトレーニング効果は、繰り返しの全力スプリント運動など血中や組織の酸素飽和度が大きく低下する条件において、より顕著に確認される (Faiss et al., 2013b)。そのため、間欠的低酸素トレーニングにおいては、血中や組織酸素飽和度を効果的に低下させる運動処方方法を選定することが、良好なトレーニング効果を惹起するた

めに必要である可能性が考えられる。

従来の低酸素トレーニングは、主に持久性運動を用いて持久性運動選手の運動パフォーマンスを高めるために行われることが一般的であった (Saunders et al., 2013; Wilber, 2007)。しかし、近年では低酸素環境下での繰り返しスプリント運動を行うことで、自転車選手や球技選手などの繰り返しスプリント運動パフォーマンスが、通常酸素条件と比較して飛躍的に高まるとの報告が多数なされている (Brocherie et al., 2017)。したがって、近年の低酸素トレーニング処方においては持久性アスリートだけでなく、スプリント運動能力を求められるアスリートも有効な処方対象となっている (Faiss et al., 2013a; Faiss and Rapillard, 2020)。しかしながら、低酸素環境下での最大下運動に関する運動トレーニング研究は無数に存在するのに対して、低酸素環境下での全力運動に関する運動トレーニング研究の数は圧倒的に不足している (McLean et al., 2014)。そこで、より幅広い競技のアスリートに対して適切に低酸素トレーニングを処方するためには、低酸素環境下での全力運動による急性の生理応答やトレーニング効果を検討するさらなる研究が不可欠である。

低酸素環境下での全力運動を用いるトレーニング方法として、5~10秒ほどの全力スプリント運動を短い休息（運動休息比 1:2~4）を挟み反復する繰り返しスプリントトレーニング (Repeated Sprint training in Hypoxia, RSH) がある。RSHは近年盛んに研究が行われており、通常酸素条件下での同様のトレーニングと比較して顕著なトレーニング効果があるとの報告が多数なされている (Brocherie et al., 2017; Faiss et al., 2013a, 2013b)。多くのRSH研究では10秒未満のスプリント運動が用いられて

いるが、運動時間を延長 (>10 秒) した際の急性の生理応答については未だ明らかではない。繰り返しスプリントトレーニング以外に全力スプリント運動を反復するトレーニング方法として、スプリンインターバルトレーニング (Sprint Interval Training, SIT) がある。SIT は、30 秒の全力スプリント運動を 4~5 分程度の休息 (運動休息比 1:8~10) を挟み反復する方法であり、研究やスポーツ現場において広く用いられている (Gibala et al., 2012; MacInnis and Gibala, 2017; Sloth et al., 2013)。SIT は通常酸素条件下においてスプリント運動 (<30 秒) から持久性運動 (<1 時間) のパフォーマンスを効果的に高める方法として知られている (Gibala and McGee et al., 2008; Gibala et al., 2006; MacDougall et al., 1998)。一方で、SIT を低酸素環境下で行った際にパフォーマンスにポジティブな効果が得られるかどうかは明確ではない (Puype et al., 2013; Takei et al., 2020a; Takei et al., 2020b)。明確なトレーニング効果が得られない原因の一つとして血中および筋中酸素飽和度が一時的に低下するものの、4~5 分といった長い休息時間によって次の運動の開始前に血中および筋中酸素飽和度が回復してしまい、低酸素刺激が不十分であることが考えられる (Takei et al., 2021)。そのため休息時間を短縮することで、十分な低酸素刺激を負荷できる可能性が考えられるが、低酸素環境下での SIT 時の休息時間を短縮した際の急性の生理応答については明らかとなっていない。そこで本研究では、低酸素環境下での RSH 時に運動時間を延長した際および SIT 時に休息時間を短縮した際の急性の生理応答について検討することを目的とした。

II 方法

1. 被験者

本研究では、駿河台大学陸上競技部の低酸素トレーニングセッション (2021 年 4 月~7 月) に参加した選手を対象として各種データを取得した。低酸素トレーニングセッションに参加する前に、本研究の意義やリスクについて十分な説明を行い、参加同意書への署名を得た。トレーニングに参加した被

験者は、16 名 (男性 11 名、女性 5 名) であった。高所で生まれたあるいは生活をしている被験者および過去 6 か月以内に高所に滞在した被験者は、本研究から除外した。本研究の研究計画および実験方法は駿河台大学倫理審査委員会より承認され (03 駿研倫第 8-1 号)、ヘルシンキ宣言に基づき実施された。

2. 測定方法

低酸素環境は駿河台大学人口環境装置を用いて構築した。低酸素環境は、常圧低酸素環境とし酸素濃度は 15% O₂ とした。人口環境装置に入室後に 10 分間のウォーミングアップを行った。ウォーミングアップは、自転車運動 (80-100W) もしくはトレッドミル走行 (200-220 m/min) で行った。ウォーミングアップ終了後に休息 (5-10 分程度) を挟み、メイントレーニングを実施した。メイントレーニングは自転車スプリント運動とし、初めにスプリント運動へのウォーミングアップとして 10 秒全力スプリント運動を 50 秒間の休息を挟み 3 回反復した。ウォーミングアップの 10 秒全力スプリント運動時の回転数を参考に、回転数が 160~220 回程度かつ被験者が主観的に漕ぎやすいと感じるような負荷値をメイントレーニングの負荷値として設定した。メイントレーニングは、10 秒全力スプリント運動 + 30 秒休息を 10 回 (10:30 条件)、15 秒全力スプリント運動 + 30 秒休息を 8 回 (15:30 条件)、30 秒全力スプリント運動 + 4.5 分休息を 5 回 (30:270 条件)、30 秒全力スプリント運動 + 2.5 分休息を 5 回 (30:150 条件) のいずれかをトレーニング日に 1 回実施した。被験者には全てのスプリント運動に対して、最大努力で行いペース配分をしないように指示した。メイントレーニングの直前および各スプリント運動直後に血中酸素飽和度、心拍数を測定した。血中酸素飽和度および心拍数はパルスオキシメーター (SAT-2200, Nihonkohden, Japan) を用いて測定した。メイントレーニングには、自転車エルゴメーター (Power Max V3, Konami, Japan) を用いて、スプリント毎の平均の発揮パワー (W) を測定した。

3. 統計処理

各測定項目に対して統計ソフト(Prism, GraphPad, USA)を用いて統計処理を行った。10:30条件および15:30条件間において、二元配置分散分析(反復回数×運動時間)を行った。また、30:150条件および30:270条件間においても、二元配置分散分析(反復回数×休息时间)を行った。有意水準は5%未満とした。

Ⅲ. 結果

1. トレーニングセッション

期間中の総トレーニングセッション数は268回であった。また、各トレーニングセッションで行った種目の内訳は、10:30条件が119回、15:30条件が57回、30:270条件が34回、30:150条件が58回であった。

2. 血中酸素飽和度

10:30条件および15:30条件の血中酸素飽和度は、スプリント運動を反復する毎に有意に低下した($p < 0.001$, 図1)。また、条件間の差($p < 0.01$)が見られ、10:30条件は15:30条件と比較して有意に低く推移した(図1)。30:150条件および30:270条件の血中酸素飽和度は、スプリント運動を反復する毎に有意に低下した($p < 0.001$, 図2)。また、条件間の差($p < 0.01$)が見られ、30:150条件は30:270条件と比較して有意に低く推移した(図2)。

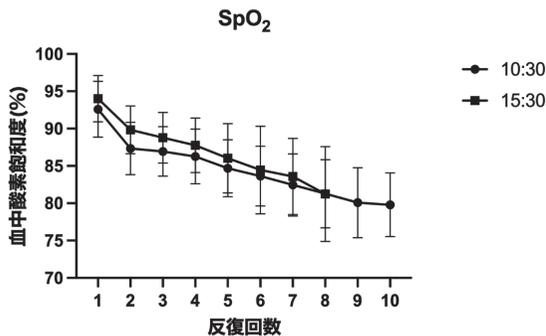


図1 10:30条件および15:30条件の血中酸素飽和度の推移

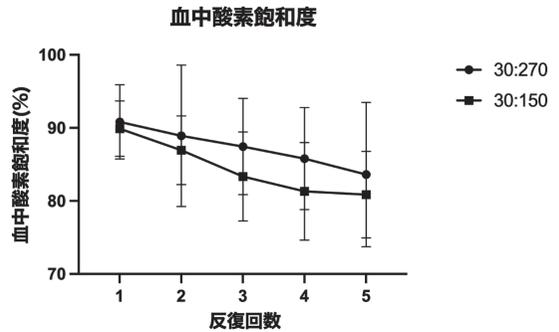


図2 30:150条件および30:270条件の血中酸素飽和度の推移

3. 心拍数

10:30条件および15:30条件の心拍数は、スプリント運動を反復する毎に有意に上昇した($p < 0.001$, 図3)。また、条件間の差($p < 0.01$)が見られ、10:30条件は15:30条件と比較して有意に高く推移した(図3)。30:150条件および30:270条件の心拍数については、反復回数($p = 0.68$)および休息时间($p = 0.58$)の両方において有意な差は見られなかった(図4)。

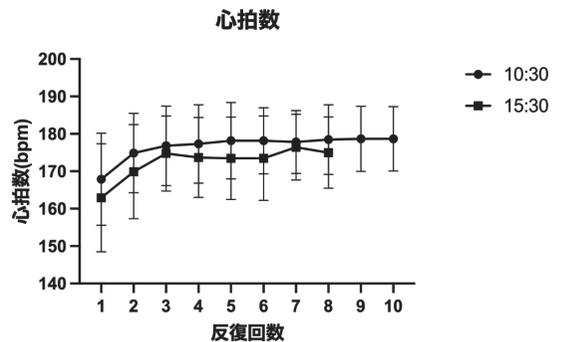


図3 10:30条件および15:30条件の心拍数の推移

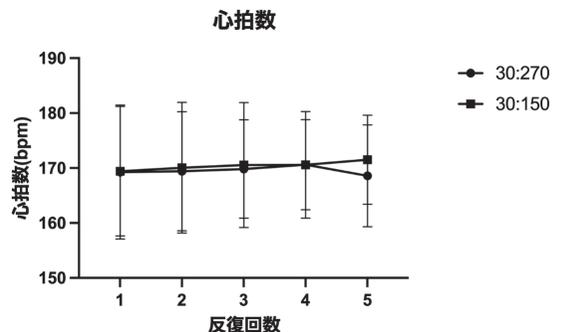


図4 30:150条件および30:270条件の心拍数の推移

4. 発揮パワー

10:30 条件および 15:30 条件の発揮パワーは、スプリント運動を反復する毎に有意に低下した ($p < 0.001$, 図 5)。一方で、条件間の差 ($p = 0.95$) が見られなかった (図 5)。30:150 条件および 30:270 条件の発揮パワーは、スプリント運動を反復する毎に有意に低下した ($p < 0.001$, 図 6)。また、条件間の差 ($p < 0.05$) が見られ、30:150 条件は 30:270 条件と比較して有意に低く推移した (図 6)。

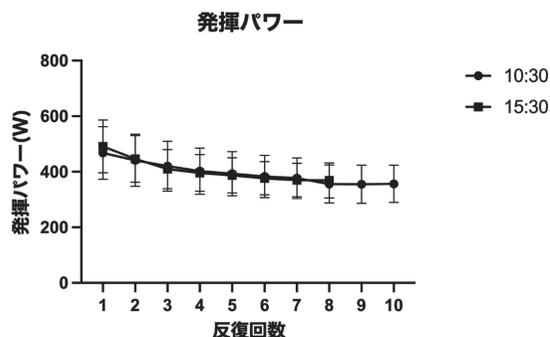


図 5 10:30条件および15:30条件の発揮パワーの推移

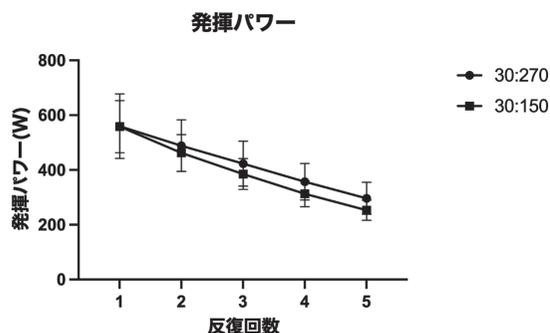


図 6 30:150条件および30:270条件の発揮パワーの推移

IV. 考察

1. 血中酸素飽和度

本研究の結果より、すべての運動条件においてスプリント運動を反復することで有意に血中酸素飽和度が低下することが示された (図 1,2)。このことから、低酸素環境下でのスプリント運動を実施する際には、ごく短時間の休息时间 (30 秒) だけでなく、より長い数分 (2.5-4.5 分) の休息を設けても血中酸素飽和度が低下し、単回のスプリント運動よりも

大きな低酸素刺激を惹起できることが示された。

30 秒休息で運動時間を変更した 10:30 条件および 15:30 条件においては、予想と反して運動時間を延長する 15:30 条件の方が 10:30 条件よりも血中酸素飽和度の低下が緩やかであることが示された (図 1)。通常、低酸素環境下での反復スプリント運動時には、運動時間が増えるごとに血中酸素飽和度がより低下すると考えられている。本研究の結果が、通常の下酸素環境下での運動時の挙動と異なった原因の可能性の一つとして、各運動条件における被験者の努力度が同一ではない可能性が考えられる。被験者にはいずれのスプリント運動に対しても最大努力で実施するように指示を与えているが、15 秒スプリント運動時には心理的障壁が大きく、努力度が無意識下で小さくなっている可能性がある。本研究で用いた運動条件 (1:2-3) は、RSH に関する先行研究での推奨される運動休息比 (1:2-5) の範囲内であるが、運動時間を延長することによりトレーニングの遂行が難しくなる可能性がある (Brocherie et al., 2017)。その他の可能性として各運動条件における男女の比率の差が影響している可能性が考えられる。10:30 条件では全 119 セッション中の男性: 女性が 53:66 であったが、15:30 条件では全 58 セッション中の男性: 女性は 36:22 であった。したがって、10:30 条件では男性は女性よりも 25% 少なく、15:30 条件では男性は女性よりも 64% 多いこととなり、相対的には 15:30 条件は、10:30 条件よりも男性の比率が 89% 高いこととなる。先行研究によると女性と男性の低酸素刺激による応答には性差が存在し、有意差には至らなかったものの同一強度の運動を行った際に女性で男性よりも 4% ほど血中酸素飽和度の低下が大きかったことが報告されている (Horiuchi et al., 2019)。本研究はあくまで陸上競技部のトレーニングを記録する観察研究であるため厳密な男女比の統制を行っていないが、今後の研究の方向性として男女比を統制した検討が必要となると考えられる。

30 秒運動で休息时间を変更した 30:150 条件および 30:270 条件においては、予想した通りに休息时间を短縮することで、血中酸素飽和度が有意

に低値を示すことが示された (図 2)。さらに、休息時間が短い 30:150 条件で 30:270 条件よりも血中酸素飽和度の低下がより顕著に起こる ($p < 0.01$) ことが確認された。先行研究では、低酸素環境下 ($14.5\%O_2$) での 4×30 秒全力スプリント運動 (4.5 分休息) において、運動により血中および組織 (外側広筋) の酸素飽和度が有意に低下することが確認されているが、休息時間中に十分に回復し、運動の反復による低下の度合いが進行することは確認されなかった (Takei et al., 2021)。本研究の結果からは、低酸素環境下 ($15\% O_2$) での 5×30 秒全力スプリント運動によって血中酸素飽和度が運動を繰り返すごとに有意に低下し、さらに休息時間を短縮することによりその低下の度合いはより顕著になることが認められた。低酸素環境下での SIT では、血中や組織酸素飽和度の低下が小さく低酸素刺激が不十分であるため、明瞭なトレーニング効果が得られない可能性が挙げられている。そこで、この課題を打開するためには、低酸素環境下での SIT での休息時間を短縮することが有効である可能性が考えられる。

2. 心拍数

10:30 条件および 15:30 条件において、心拍数はスプリント運動を反復する毎に有意に増加した (図 3)。単回のスプリント運動後に心拍数は 160-170 bpm 程度であり、さらにスプリント運動を反復することで 170-180 bpm 程度であり、心循環系へのトレーニング効果が期待できる可能性がある。一方で、15:30 条件において 10:30 条件よりも心拍数が有意に低く推移し、心循環系へのトレーニング効果が低下している可能性が考えられる。しかし、前述のとおり 15 秒スプリント運動による心理的障壁が生じた可能性があるものの、男女比率の偏りによる影響も考えられ、今後さらなる検討が必要である。

30:150 条件および 30:270 条件においては、反復回数による主効果も休息時間による主効果も認められなかった (図 4)。先行研究においても低酸素環境下 ($14.5\%O_2$) での 4×30 秒全力スプリント運動時にスプリント運動を反復しても心拍数の増大

は認められず (Takei et al., 2021)、本研究の結果はこの先行研究を支持するものである。また、低酸素環境下での SIT を実施する際には、休息時間を短縮することにより血中酸素飽和度が有意に低下するが、一方で心拍の応答には差がないことが確認された。そのため、低酸素環境下での SIT では休息時間を短縮することで低酸素刺激を増大することができるが、心循環系へのトレーニング効果は変わらない可能性があり、トレーニングの目的に応じて休息時間を設定することが重要である可能性がある。

3. 発揮パワー

10:30 条件および 15:30 条件において、発揮パワーはスプリント運動を反復する毎に有意に低下したが、運動時間の主効果は認められなかった (図 5)。通常、運動時間が延長されるほど運動中の平均発揮パワーは低下するが、本研究では反対の結果を示した。この点は、各条件の男女比が大きく異なることにより影響を強く受けていると考えられる。したがって、より正確に検討するためには、男女比を厳密に統制した追加の検討が必要となる。

30:150 条件および 30:270 条件においては、反復回数による主効果も休息時間による主効果も認められた (図 6)。したがって、低酸素環境下での SIT においては、休息時間を短縮することで血中酸素飽和度が有意に低下しより顕著な低酸素刺激を惹起するものの、一方で力学的な刺激 (総仕事量) は減少すると考えられる。したがって、低酸素環境下での SIT を実施する際には、トレーニングの目的 (生理学的刺激 vs 力学的刺激) に応じて休息時間を調整することが必要である可能性がある。

V. 結論

低酸素環境下での運動処方に関して、RSH においては運動時間を延長することにより、低酸素刺激や心循環系への刺激が低下する可能性が示された。RSH の結果については、男女比による影響の可能性があり、今後男女比を統制した追加の検討が必要である。低酸素環境下での SIT においては、休息時間を短縮することで低酸素刺激を増強できる可能性

が示されたが、他方で力学的な刺激が低下する可能性が示された。このことから、低酸素環境下でのSITを実施する際には、トレーニングの目的に応じて休息時間を調整する必要があると考えられる。

VI. 参考文献

1. **Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP.** (2017). Effects of repeated-sprint training in hypoxia on sea-level performance: A meta-analysis. *Sports Med.* 47:1651-60.
2. **Brocherie F, Millet GP, D'Hulst G, Van Thienen R, Deldicque L, Girard O.** (2018). Repeated maximal-intensity hypoxic exercise superimposed to hypoxic residence boosts skeletal muscle transcriptional responses in elite team-sport athletes. *Acta Physiol.* 222: e12851.
3. **Faiss R, Rapillard A.** (2020). Repeated sprint training in hypoxia: Case report of performance benefits in a professional cyclist. *Front Sports Act Living.* 2:35.
4. **Faiss R, Girard O, Millet GP.** (2013a). Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br J Sports Med.* 47:i45-50.
5. **Faiss R, Léger B, Vesin JM, Fournier PE, Egel Y, Dériaz O, Millet GP.** (2013b). Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One.* 8:e56522.
6. **Gibala MJ, McGee SL.** (2008). Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exerc Sport Sci Rev.* 36:58-63.
7. **Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, Hawley JA.** (2012). Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J Physiol.* 590:1077-84.
8. **Gibala MJ, Little JP, van Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, Tarnopolsky MA.** (2006). Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J Physiol.* 575:901-11.
9. **Girard O, Brocherie F, Goods PSR, Millet GP.** (2020). An updated panorama of "living low-training high" altitude/hypoxic methods. *Front. Sports Act. Living.* 2:26.
10. **Horiuchi M, Kirihara Y, Fukuoka Y, Pontzer H.** (2019) Sex differences in respiratory and circulatory cost during hypoxic walking: potential impact on oxygen saturation. *Sci Rep.* 9:9550.
11. **Lundby C, Calbet JA, Robach P.** (2009). The response of human skeletal muscle tissue to hypoxia. *Cell Mol Life Sci.* 66:3615-23.
12. **MacDougall JD, Hicks AL, MacDonald JR, McKelvie RS, Green HJ, Smith KM.** (1998). Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *J Appl Physiol.* 84:2138-42.
13. **MacInnis MJ, Gibala MJ.** (2017). Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity. *J Physiol.* 595:2915-30.
14. **McLean BD, Gore CJ, Kemp J.** (2014). Application of 'live low-train high' for enhancing normoxic exercise performance in team sport athletes. *Sports Med.* 44:1275-87.
15. **Puype J, Van Proeyen K, Raymackers JM, Deldicque L, Hespel P.** (2013). Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Med Sci Sports Exerc.* 45:2166-74.
16. **Saunders PU, Garvican-Lewis LA, Schmidt WF, Gore CJ.** (2013). Relationship between changes in haemoglobin mass and maximal oxygen uptake after hypoxic exposure. *Br J Sports Med.* 47:i26-30.

17. **Sloth M, Sloth D, Overgaard K, Dalgas U.** (2013). Effects of sprint interval training on VO₂max and aerobic exercise performance: A systematic review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*. 23:e341-52.
18. **Takei N, Kakinoki K, Girard O, Hatta H.** (2020) Short-Term Repeated Wingate Training in Hypoxia and Normoxia in Sprinters. *Front Sports Act Living*. 2:43.
19. **Takei N, Soo J, Hatta H, Girard O.** (2021) Performance, Metabolic, and Neuromuscular Consequences of Repeated Wingates in Hypoxia and Normoxia: A Pilot Study. *Int J Sports Physiol Perform*. 16:1208-1212.
20. **Vogt M, Puntchart A, Geiser J, Zuleger C, Billeter R, Hoppeler H.** (2001). Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J Appl Physiol*. 91:173-82.
21. **Wilber RL.** (2007). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 39:1610-24.

